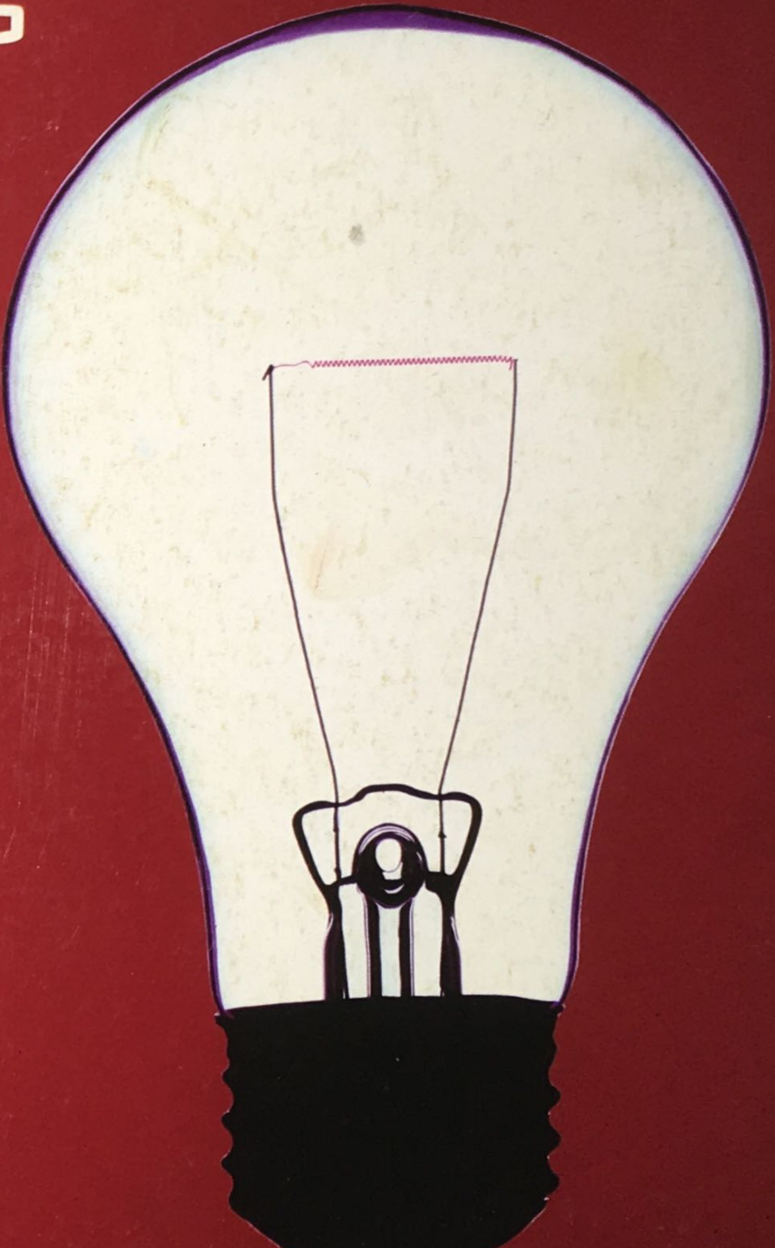
חשמל ומגנטיות

ספר פתרונות

כרך ב׳



על-פי תוכנית

הלימודים החדשה

משה פרידמן

רכס

פרויקטים חינוכיים בע״מ

תוכן העניינים

פרק 6: קבלים.......... 7
פרק 7: השדה המגנטי.......... 38
פרק 8: מקורות השדה המגנטי.......... 62
פרק 9: השראה אלקטרומגנטית.......... 81

תודות לאנשים יקרים שעזרו כל אחד בדרכו בהפקת הספר

- ד"ר תהלה בן גיא מנהלת חמד"ע
- אלוף (מיל') אברהם בן שושן – מנכ"ל קרן תל-אביב
- גב' קורינה פולינגר, מהצוות החינוכי של חמד"ע, קראה, העירה והאירה
- ד"ר איליה מזין שתמך, קרא והעיר הערות חשובות
- מר רוני זמירי על תצלומים מרהיבים
- למשפחתי האהובה שוש, רונית, ליאור, אייל ועמית, המעגל הראשון - אתם החומה.

פרק 6 - קבלים

שאלות 1-5 עוסקות בקשרים הבאים: $C = \varepsilon_0 \frac{A}{d}$; $C = \frac{q}{V}$

1. המטען הוא:

$$q = CV = 10^{-9} F \cdot 10^{3} Volt = 10^{-6} C = 1\mu C$$

2. המתח בין הלוחות הוא:

$$V = \frac{q}{C} = \frac{5 \cdot 10^{-6}}{10^{-9}} = 5 \cdot 10^{3} Volt$$

.3

א. נחשב את שטח הלוחות:

$$C = \varepsilon_0 \frac{A}{d} \quad \Rightarrow \quad A = \frac{Cd}{\varepsilon_0} = \frac{10^{-8} \cdot 10^{-3}}{8.85 \cdot 10^{-12}} = 1.13 m^2$$

ב. המתח בין הלוחות הוא:

$$V = \frac{q}{C} = \frac{2 \cdot 10^{-12}}{10^{-8}} = 2 \cdot 10^{-4} Volt$$

.4

א. הקיבול הוא:

$$C = \varepsilon_0 \frac{A}{d} = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{2}{10^{-2}} = 1.77 \cdot 10^{-9} F = 1.77 nF$$

ב. מטען הקבל הוא:

$$q = CV = 1.77 \cdot 10^{-9} \cdot 10^{3} = 1.77 \cdot 10^{-6} C = 1.77 \mu C$$

ג.

1) הקיבול תלוי במאפיינים הגיאומטריים של הקבל ובסוג החומר שבין לוחותיו. לכן גודל הקיבול לא ישתנה.
הערה: במקרה זה, כיוון שלא נאמר אחרת, אנו מניחים שבין הלוחות יש ריק או אוויר.

2) מטען הקבל מתכונתי (פרופורציוני) למתח הקיים בין לוחותיו. לכן, מטענו יגדל פי 10.

.5

א. הפרש הפוטנציאלים הוא:

$$V=\frac{q}{C}=\frac{10^{-7}}{50\cdot10^{-9}}=2Volt$$

ב. נחשב את שטחו של כל אחד מהלוחות ביחידות SI[1]:

$$C=\varepsilon_0\frac{A}{d}\quad\Rightarrow\quad A=\frac{Cd}{\varepsilon_0}=\frac{50\cdot10^{-9}\cdot5\cdot10^{-4}}{8.85\cdot10^{-12}}=2.82m^2$$

ג. תזכורת: צפיפות המטען מוגדרת ככמות המטען ליחידת שטח. לכן:

$$\sigma=\frac{q}{A}=\frac{10^{-7}}{2.82}=3.54\cdot10^{-8}C/m^2$$

ד. עוצמת השדה בין לוחות הקבל אחידה (בקירוב, פרט לקצוות) וניתנת לחישוב על ידי הקשר:

$$E=\frac{V}{d}=\frac{2}{5\cdot10^{-4}}=4\cdot10^{3}Volt/m$$

.6

א. הפרש הפוטנציאלים הוא:

$$E=\frac{V}{d}\quad\Rightarrow\quad V=Ed=4\cdot10^{3}\cdot2\cdot10^{-3}=8Volt$$

ב. נחשב את הקיבול:

$$C=\varepsilon_0\frac{A}{d}=\frac{8.85\cdot10^{-12}\cdot(0.06\cdot0.02)}{2\cdot10^{-3}}=5.31\cdot10^{-12}F$$

ג. המטען הוא:

$$q=CV=5.31\cdot10^{-12}\cdot8=4.25\cdot10^{-11}C$$

ד. לפי החוק השני של ניוטון ולפי הקשרים בין עוצמת השדה החשמלי לבין הכוח שפועל על מטען, מתקיים:

$$a=\frac{\sum F}{m}=\frac{Eq}{m}=\frac{4\cdot10^{3}q}{m}$$

[1] יחידות SI הן: kg ,m ,s ,A

.7

א. המטען הוא:

$$q=CV=2\cdot10^{-6}\cdot10^{3}=2\cdot10^{-3}C$$

ב. כדי שהפרש הפוטנציאלים יוכפל, המטען על פני כל אחד מהלוחות צריך להיות $2q$. יש להוסיף לכל אחד מהלוחות עוד מטען בשיעור $2\cdot10^{-3}C$ (מטען חיובי ללוח החיובי ומטען שלילי ללוח השלילי).

.8

א. המטען הוא:

$$q_1=CV_1=2\cdot10^{-6}\cdot500=10^{-3}C$$

ב. אם המתח בין הלוחות קטן ל-$300V$, כמות המטען q_2 על כל לוח היא:

$$q_2=CV_2=2\cdot10^{-6}\cdot300=6\cdot10^{-4}C$$

המטען Δq שיש לסלק מכל לוח הוא:

$$\Delta q=q_1-q_2=10^{-3}-6\cdot10^{-4}=4\cdot10^{-4}C$$

חיבור קבלים במקביל

.9

א. המתח על כל קבל הינו $100V$, לכן:

$$q_1=C_1V=8\cdot10^{-6}\cdot100=8\cdot10^{-4}C$$
$$q_2=C_2V=2\cdot10^{-6}\cdot100=2\cdot10^{-4}C$$

ב. ערכו של הקבל השקול הוא:

$$C_T=C_1+C_2=10\cdot10^{-6}=10^{-5}F$$
$$q_T=q_1+q_2=(8+2)\cdot10^{-4}C=10^{-3}C$$

אפשר גם:

$$q_T=C_T\cdot V=10^{-5}\cdot100=10^{-3}C$$

10.

א. נחשב תחילה את המתח על הקבלים:

$$V=V_1=V_2=\frac{q_1}{C_1}=\frac{9\cdot10^{-5}}{3\cdot10^{-6}}=30Volt$$

$$\Rightarrow\quad q_2=C_2\cdot V=4.5\cdot10^{-6}\cdot30=1.35\cdot10^{-4}C$$

ב. נחשב את המטען על הקבל C_1 מתוך יחס הקיבולים:

$$\frac{q_1}{q_2}=\frac{C_1}{C_2}\quad\Rightarrow\quad q_1=q_2\cdot\frac{C_1}{C_2}=1.35\cdot10^{-4}\frac{3\mu F}{4.5\mu F}=9\cdot10^{-5}C$$

המטען על הקבל השקול הוא:

$$q_T=q_1+q_2=9\cdot10^{-5}+1.35\cdot10^{-4}=2.25\cdot10^{-4}C$$

11. ראשית, נחשב את ערכו של הקיבול השקול:

$$C_T=\frac{q_T}{V}=\frac{7.2\cdot10^{-4}}{36}=2\cdot10^{-5}F$$

א. אם $n=1$ מתקבל:

$$C=C_T=2\cdot10^{-5}F$$
$$q=q_T=7.2\cdot10^{-4}C$$
$$V=36Volt$$

ב. אם $n=2$ מתקבל:

$$C=\frac{C_T}{2}=\frac{2\cdot10^{-5}}{2}=10^{-5}F$$
$$q=\frac{q_T}{2}=3.6\cdot10^{-4}C$$
$$V=36Volt$$

ג. אם $n=3$ מתקבל:

$$C=\frac{C_T}{3}=\frac{2\cdot10^{-5}}{3}=6.66\cdot10^{-6}F$$
$$q=\frac{q_T}{3}=\frac{7.2\cdot10^{-4}}{3}=2.4\cdot10^{-4}C$$
$$V=36Volt$$

ד. עבור n קבלים מחוברים במקביל, מתקבל:

$$C=\frac{C_T}{n}=\frac{2\cdot10^{-5}}{n}F$$
$$q=\frac{q_T}{n}=\frac{7.2\cdot10^{-4}}{n}C$$
$$V=36Volt$$

חיבור טורי ומעורב של קבלים, אנרגיה אגורה בקבל

12.

א. הקבלים מחוברים בטור ונתון ש- $C_1=C_2$. גם מטעני הקבלים שווים, $q_1=q_2$, כי הקבלים מחוברים בטור ולכן המתחים על פני הקבלים שווים:

$$V_1=V_2=\frac{V_{xy}}{2}=\frac{200}{2}=100Volt$$

ב.
$$q_1=q_2=2\cdot10^{-6}\cdot100=2\cdot10^{-4}C$$

13.

א. הקבלים מחוברים בטור. לכן מתקיים:

$$\frac{1}{C_T}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}=\frac{1}{2\cdot10^{-6}}+\frac{1}{8\cdot10^{-6}}=\frac{4+1}{8\cdot10^{-6}}=\frac{5}{8\cdot10^{-6}}$$

$$\Rightarrow\quad C_T=\frac{8\cdot10^{-6}}{5}=1.6\mu F$$

ב.
$$q_T=C_T\cdot V_{xy}=1.6\cdot10^{-6}\cdot200=3.2\cdot10^{-4}C$$

ג. המטען על כל אחד מהקבלים המחוברים בטור הוא כמטענו של הקבל השקול. לכן:

$$q_1=q_2=q_T=3.2\cdot10^{-4}C$$

ערכי המתחים על כל אחד מהקבלים הם:

$$V_1=\frac{q_1}{C_1}=\frac{3.2\cdot10^{-4}}{2\cdot10^{-6}}=160Volt$$
$$V_2=\frac{q_2}{C_2}=\frac{3.2\cdot10^{-4}}{8\cdot10^{-6}}=40Volt$$

את המתח על הקבל השני אפשר לחשב גם באופן הבא:

$$V_2=V_{xy}-V_1=200-160=40Volt$$

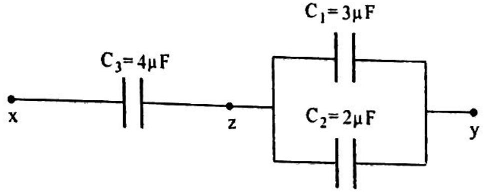
ד. האנרגיה האגורה בכל קבל היא:

$$U_1=\frac{1}{2}C_1V_1^2=\frac{1}{2}\cdot 2\cdot 10^{-6}\cdot 160^2=2.56\cdot 10^{-2}J$$

$$U_2=\frac{1}{2}C_2V_2^2=\frac{1}{2}\cdot 8\cdot 10^{-6}\cdot 40^2=6.4\cdot 10^{-3}J$$

.14

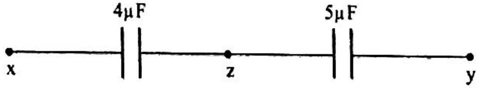
א. ראשית נחשב את הקיבול השקול של שלושת הקבלים. באיור המצורף, הקבלים מחוברים ביניהם כמו באיור המקורי, אך כאן אולי קל יותר לזהות שהקבלים C_1 ו-C_2 מחוברים ביניהם במקביל.



לכן:

$$C_{1+2}=C_1+C_2=3\mu F+2\mu F=5\mu F$$

לערך שהתקבל נחבר בטור את הקבל השלישי:



$$\frac{1}{C_T}=\frac{1}{C_{1+2}}+\frac{1}{C_3}=\frac{1}{5\mu F}+\frac{1}{4\mu F}=\frac{9}{20\mu F}\quad\Rightarrow\quad C_T=2.22\mu F$$

נחשב את המטען על הקבל השקול:

$$q_T=C_T\cdot V_{xy}=2.22\cdot 10^{-6}\cdot 600=1.33\cdot 10^{-3}C$$

מטענו של הקבל C_3 הוא כמטענו של הקבל השקול, q_T, לכן:

$$q_3=q_T=1.33\cdot 10^{-3}C$$

המטען q_T מתחלק בין הקבלים C_1 ו-C_2 על פי יחס קיבוליהם, כלומר:

$$\frac{q_1}{q_2}=\frac{C_1}{C_2}=\frac{3}{2}=1.5\quad\Rightarrow\quad q_1=1.5q_2$$

לפי חוק שימור המטען, מתקיים:

$$q_1+q_2=q_T$$

$$1.5q_2+q_2=1.33\cdot 10^{-3}C\quad\Rightarrow\quad q_2=\frac{1.33\cdot 10^{-3}}{2.5}=5.33\cdot 10^{-4}C$$

$$q_1=1.5q_2=1.5\cdot 5.33\cdot 10^{-4}=8\cdot 10^{-4}C$$

ב. המתח על כל קבל הוא:

$$V_1=V_2=\frac{q_1}{C_1}=\frac{8\cdot 10^{-4}}{3\cdot 10^{-6}}\approx 267Volt$$

$$V_3=600-267=333Volt$$

ג. את האנרגיה האגורה בקבל C_1 נחשב באופן הבא:

$$U_{(1)}=\frac{C_1V_1^2}{2}=\frac{3\cdot 10^{-6}\cdot 267^2}{2}=0.107J$$

.15

א. על פי הפתרון לתרגיל 14, מתקיים:

$$C_{1+2}=9\mu F$$

$$\frac{1}{C_T}=\frac{1}{C_{1+2}}+\frac{1}{C_3}=\frac{1}{9\mu F}+\frac{1}{18\mu F}=\frac{3}{18\mu F}=\frac{1}{6\mu F}\quad\Rightarrow\quad C_T=6\mu F$$

ב. מטעני הקבלים הם:

$$q_T=C_T\cdot V_{xy}=6\cdot 10^{-6}\cdot 72=4.32\cdot 10^{-4}C$$

$$q_3=q_T=4.32\cdot 10^{-4}C$$

$$q_1+q_2=q_T=4.32\cdot 10^{-4}C$$

$$\frac{q_1}{q_2}=\frac{C_1}{C_2}=\frac{3}{6}=0.5\quad\Rightarrow\quad q_2=2q_1$$

$$3q_1=4.32\cdot 10^{-4}C\quad\Rightarrow\quad q_1=\frac{4.32\cdot 10^{-4}C}{3}=1.44\cdot 10^{-4}C$$

$$q_2=2q_1=2.88\cdot 10^{-4}C$$

ג. הפרשי הפוטנציאלים על הקבלים הם:

$$V_1=V_2=\frac{q_1}{C_1}=\frac{1.44\cdot 10^{-4}}{3\cdot 10^{-6}}=48Volt$$

$$V_3=72-48=24Volt$$

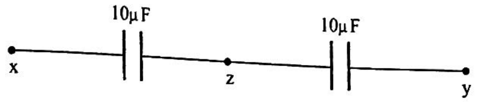
ד. המתח בין הנקודות xz שווה למתח על הקבל C_3, וערכו $24V$.

.16

א. נחבר את שני זוגות הקבלים המחוברים במקביל.

$$C_{1+2} = 10\mu F \quad ; \quad C_{3+4} = 10\mu F$$

מתקבל המערך הבא:



קיבולו של הקבל השקול לכל הקבלים יחד, ניתן לחישוב באופן הבא:

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_{1+2}} + \frac{1}{C_{3+4}} = \frac{1}{10\mu F} + \frac{1}{10\mu F} = \frac{2}{10\mu F}$$

$$\Rightarrow \quad C_T = 5\mu F$$

נחשב את המטען על הקבל השקול:

$$q_T = C_T \cdot V_{xy} = 5 \cdot 10^{-6} \cdot 30 = 1.5 \cdot 10^{-4} C$$

מטען זה מתפלג ביחס של 1:1 בין הקבלים C_1 ו-C_2 ובאופן דומה גם בין הקבלים C_3 ו-C_4.

לכן:

$$q_1 = q_2 = q_3 = q_4 = \frac{1.5 \cdot 10^{-4} C}{2} = 7.5 \cdot 10^{-5} C$$

ב. המתחים בין לוחות הקבלים זהים וערכם הוא:

$$V_1 = V_2 = V_3 = V_4 = \frac{q_1}{C_1} = \frac{7.5 \cdot 10^{-5}}{5 \cdot 10^{-6}} = 15 Volt$$

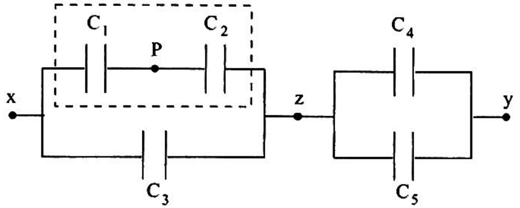
ג. היות שהקבלים זהים ומתח הקבלים זהה, בכל אחד מהם אגורה כמות זהה של אנרגיה. לכן:

$$\sum U = 4U_{(1)} = 4\frac{C_1 V_1^2}{2} = 4\frac{5 \cdot 10^{-6} \cdot 15^2}{2} = 2.25 \cdot 10^{-3} J$$

ד. בין הנקודות xz אגורה מחצית מהאנרגיה הכללית $U_{xz} = 1.125 \cdot 10^{-3} J$.

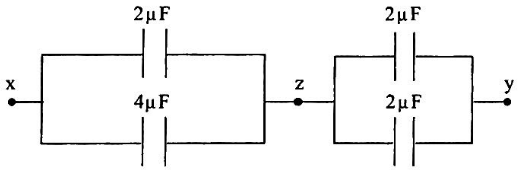
.17

א. בענף העליון, שני הקבלים C_1 ו-C_2 מחוברים ביניהם בטור, לכן:

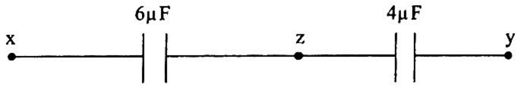


$$\frac{1}{C_{1+2}} = \frac{1}{4} + \frac{1}{4} \quad \Rightarrow \quad C_{1+2} = 2\mu F$$

אחרי חיבורם מתקבל המערך הבא:



נחבר את הקבלים המקבילים . מתקבל המערך הבא:



הקבל השקול C_T מתקבל על ידי חיבור בטור של שני הקבלים מן האיור הקודם.

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{6\mu F} + \frac{1}{4\mu F} = \frac{10}{24\mu F}$$

$$C_T = 2.4\mu F$$

לכן:

$$U = \frac{C_T \cdot V_{xy}^{\ 2}}{2} = \frac{2.4 \cdot 10^{-6} \cdot 120^2}{2} = 17.28 \cdot 10^{-3} J$$

ב. נמצא את יחס המתחים לפי יחס הקיבולים במעגל המתואר בתרשים האחרון (נזכיר: בחיבור שני קבלים בטור, יחס המתחים הפוך ליחס הקיבולים):

$$\frac{V_{xz}}{V_{zy}} = \frac{4\mu F}{6\mu F} = \frac{2}{3} \quad \Rightarrow \quad V_{xz} = \frac{2}{3}V_{zy}$$

$$V_{xz} + V_{zy} = 120Volt$$

$$\frac{2}{3}V_{zy} + V_{zy} = 120Volt \quad \Rightarrow \quad V_{zy} = \frac{3}{5}\cdot 120 = 72Volt$$

$$V_{xz} = \frac{2}{3}V_{zy} = \frac{2}{3}\cdot 72 = 48Volt$$

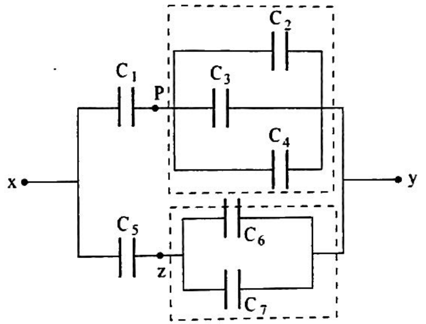
ג. המתח V_{xp} הוא מחצית המתח V_{xz}. לכן, $V_{xp} = 24Volt$.

ד. $V_{xp} = V_{pz} = 24Volt$. לכן:

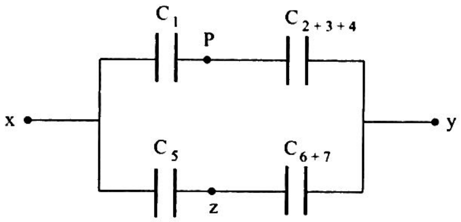
$$U_{(C2)} = \frac{C_2V_2^2}{2} = \frac{4\cdot 10^{-6}\cdot 24^2}{2} = 1.15\cdot 10^{-3}J$$

18.

א. נתונה המערכת הבאה:



אחרי חיבור שלישיית הקבלים המקבילים 2, 3, 4 והצמד המקביל 6, 7 מתקבל המערך הבא:



על פי היחס $\frac{C}{C^*} = \frac{V^*}{V}$ המתקיים עבור קבלים מחוברים בטור, בענף העליון מתקבל:

$$\frac{C_1}{C_{2+3+4}} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{12}{6} = 2 \quad \Rightarrow \quad V_2 = 2V_1$$

$$V_1 + V_2 = 240Volt$$

$$V_1 + 2V_1 = 240Volt \quad \Rightarrow \quad V_1 = V_{xp} = 80Volt$$

ב. באופן דומה, בענף התחתון מתקבל $V_{xz} = 80\ Volt$.

ג. לפי הסעיפים הקודמים, בין הנקודות x ו-p ובין הנקודות x ו-z קיים הפרש פוטנציאלים זהה:

$$V_{xp} = V_{xz} = 80Volt \quad \Rightarrow \quad V_x - V_p = V_x - V_z$$

$$\Rightarrow \quad V_p = V_z \quad \Rightarrow \quad V_{pz} = V_p - V_z = 0$$

19.

א. נחשב את מטענו של הקבל:

$$q = CV = 2\cdot 10^{-6}\cdot 10^3 = 2\cdot 10^{-3}C$$

ב. האנרגיה האגורה בקבל היא:

$$U_{(C_1)} = \frac{CV^2}{2} = \frac{2\cdot 10^{-6}\cdot (10^3)^2}{2} = 1J$$

ג. משיקולי סימטריה ניתן להסיק שהמטען מתחלק ביחס 1:1 בין הקבלים. מטענו q' של כל קבל הוא $1\cdot 10^{-3}C$. לכן, המתח על פני כל אחד מהקבלים ניתן על ידי הביטוי:

$$V' = \frac{q'}{C} = \frac{10^{-3}}{2\cdot 10^{-6}} = 500Volt$$

ד. נחשב את האנרגיה של הקבל השקול C_T המייצג את זוג הקבלים המחוברים במקביל:

$$C_T = C_1 + C_2 = 4\mu F$$
$$V' = 500Volt$$
$$U_{(C_T)} = \frac{1}{2}C_T(V')^2 = \frac{1}{2}\cdot 4\cdot 10^{-6}\cdot 500^2 = 0.5J$$

ה. נחשב את הפרש האנרגיה האגורה בקבלים:

$$\Delta U = U_{(C_T)} - U_{(C_1)} = 0.5 - 1 = -0.5J$$

הסימן השלילי בתוצאה מבטא את העובדה שתכולת האנרגיה במערכת הסופית קטנה מאשר תכולתה בקבל היחיד.

ו. האנרגיה החסרה באה לידי ביטוי בהתחממות המוליכים דרכם זרמו המטענים אחרי שהקבלים חוברו יחד. זרם זה מתאפס לאחר שהמטענים הגיעו לשיווי משקל אלקטרו-סטטי.

.20

א. שני הסעיפים של תרגיל זה זהים לתרגיל הקודם:

$$q_1 = C_1V = 2\cdot 10^{-6}\cdot 10^3 = 2\cdot 10^{-3}C$$

ב.

$$U_{(C_1)} = \frac{C_1V^2}{2} = \frac{2\cdot 10^{-6}\cdot (10^3)^2}{2} = 1J$$

ג. נסמן את כמויות המטענים על הקבלים לאחר שחוברו ב-q_1' וב-q_2' בהתאמה. המטענים מתחלקים בין הקבלים על פי יחס קיבוליהם:

$$\frac{q_1'}{q_2'} = \frac{C_1}{C_2} = \frac{1}{2} \quad \Rightarrow \quad q_2' = 2q_1'$$

לפי חוק שימור המטען, מתקיים:

$$q_1' + q_2' = q_1 = 2\cdot 10^{-3}C \quad \Rightarrow \quad q_1' + 2q_1' = 2\cdot 10^{-3}C$$
$$\Rightarrow \quad q_1' = \frac{2}{3}10^{-3}C \quad ; \quad q_2' = \frac{1}{3}10^{-3}C$$
$$V' = \frac{q_1'}{C_1} = \frac{q_2'}{C_2} = \frac{\frac{2}{3}10^{-3}}{2\cdot 10^{-6}} = 333.33Volt$$

ד. כאמור בסעיף הקודם, יחס המטענים הוא 1:2.

ה. האנרגיה שנותרה בקבלים לאחר צירוף הקבל הלא טעון היא:

$$U = \frac{1}{2}(C_1 + C_2)\cdot (V')^2 = 0.5\cdot 6\cdot 10^{-6}\cdot 333.33^2 = 0.33J$$

מסקנה:

כפי שמתברר מפתרון תרגילים 19 ו-20, **חלק ניכר** מהאנרגיה האגורה בקבל (או באופן כללי במוליך) אובדת בעת שחלק מהמטענים עוברים מקבל אחד למשנהו (או ממוליך אחד למשנהו). אנרגיה זו באה לידי ביטוי בהתחממות המוליכים.

.21

א. נחשב את מתח הקבל V_0:

$$V_0 = \frac{q_0}{C_0} = \frac{10^{-6}}{10^{-9}} = 10^3 Volt$$

ב. כתוצאה משינוי המרווח בין לוחות הקבל, משתנה ערך הקיבול C_0 ועתה יהיה ערכו C:

$$C_0 = \varepsilon_0\frac{A_0}{d_0}$$
$$C = \varepsilon_0\frac{A}{2d_0} = \frac{C_0}{2}$$
$$V = \frac{q_0}{C} = \frac{q_0}{C_0/2} = \frac{2q_0}{C_0} = 2V_0 = 2\cdot 10^3 Volt$$

ג. במקרה זה, העבודה W שווה בערכה להפרש בין האנרגיה האגורה בקבל בתום הרחקת לוחותיו, U_f, לבין האנרגיה ההתחלתית האגורה בו, U_0:

$$W = U_f - U_0 = \frac{qV}{2} - \frac{qV_0}{2} = \frac{q}{2}(V - V_0) = \frac{10^{-6}}{2}(2\cdot 10^3 - 10^3) = 5\cdot 10^{-4}J$$

.22

א. נחשב את מטען הקבל:

$$q_0 = C_0V_0 = 10^{-9}\cdot 12 = 1.2\cdot 10^{-8}C$$

ב. האנרגיה האגורה בקבל היא:

$$U_0 = \frac{C_0V_0^2}{2} = \frac{10^{-9}\cdot 12^2}{2} = 7.2\cdot 10^{-8}J$$

ג. כפי שהוסבר בפתרון התרגיל הקודם, ערך הקיבול קטן פי 2, וערכו החדש הוא $C_0/2$; המתח בין הלוחות נותר $12V$, לכן:

$$q = \frac{C_0}{2}V_0 = \frac{q_0}{2} = \frac{1.2\cdot 10^{-8}}{2} = 6\cdot 10^{-9}C$$

ד. האנרגיה U_f האגורה בקבל לאחר הרחקת לוחותיו היא:

$$U_f=\frac{CV^2}{2}=\frac{(C_0/2)V_0^2}{2}=\frac{C_0V_0^2}{4}=\frac{U_0}{2}=\frac{7.2\cdot10^{-8}}{2}=3.6\cdot10^{-8}J$$

ה. הרחקת הלוחות כרוכה בהשקעת עבודה כנגד הכוחות החשמליים, ומצד שני האנרגיה האגורה בקבל קטֵנה. יש לשים לב לכך שגם כמות המטען האגורה בקבל קטֵנה. לכאורה יש כאן סתירה. ניתן להסביר זאת באופן הבא:

חלק מהאנרגיה אובדת במוליכים ומתבטאת בהתחממותם. חלק אחר של האנרגיה גורם לטעינת המצבר: בעת הרחקת לוחות הקבל, זורם במצבר זרם טעינה! כלומר, נאגרת אנרגיה במצבר.

.23

א. זמן רב אחרי שהמתג נסגר, ענף הקבל מהווה נתק במעגל, לכן המתח על הקבל שווה בערכו למתח על הנגד:

$$V_C=V_R=IR=\left(\frac{\varepsilon}{R+r}\right)R=\frac{12}{3+1}\cdot3=9Volt$$

ב. האנרגיה הנאגרת בקבל היא:

$$U=\frac{CV^2}{2}=\frac{2\cdot10^{-6}\cdot9^2}{2}=8.1\cdot10^{-5}J$$

ג. עבור נגד של 7Ω התוצאות הן:

$$V_C=V_R=IR=\left(\frac{\varepsilon}{R+r}\right)\cdot R=\left(\frac{12}{7+1}\right)\cdot7=10.5Volt$$

$$U=\frac{CV^2}{2}=\frac{2\cdot10^{-6}\cdot10.5^2}{2}=1.1\cdot10^{-4}J$$

.24 א+ב.

שני הנגדים מחוברים בטור. במצב עמיד, דרך הקבלים לא עובר זרם. במקרה זה עוצמת הזרם בסוללה ובנגדים היא:

$$I=\frac{\varepsilon}{\sum R}=\frac{12}{4+2}=2A$$

המתח על הנגד בן 4Ω הוא: $V_{4\Omega}=IR=2\cdot4=8Volt$. זהו המתח גם על כל זוג קבלים זהים בענף העליון והתחתון במעגל הנתון. לכן, המתח על כל קבל הוא מחצית ממתח הנגד, כלומר $4Volt$. על סמך ידיעת המתח, נחשב את מטען הקבלים:

$$q_{4\mu F}=CV=4\cdot10^{-6}\cdot4=1.6\cdot10^{-5}C$$

$$q_{8\mu F}=CV=8\cdot10^{-6}\cdot4=3.2\cdot10^{-5}C$$

המתח על הקבל הבודד הוא: $V_{zy}=12-8=4Volt$

לכן מטענו: $q_{Czy}=8\cdot10^{-6}\cdot4=3.2\cdot10^{-5}C$

ג. על פי כיוון הזרם בנגדים ניתן להסיק ש- $V_x<V_y$. ערך המתח המבוקש הינו:

$$V_{xy}=V_{xz}+V_{zy}=4+4=8Volt$$

.25

א. נחשב את ההתנגדות השקולה ואת הקיבול השקול של המעגל הנתון:

$$\frac{1}{R_T}=\frac{1}{12}+\frac{1}{6}=\frac{3}{12}\quad\Rightarrow\quad R_T=4\Omega$$

$$\frac{1}{C_T}=\frac{1}{8\mu F}+\frac{1}{4\mu F}+\frac{1}{8\mu F}=\frac{4}{8\mu F}\quad\Rightarrow\quad C_T=2\mu F$$

ב. עוצמת הזרם בענף העליון היא:

$$I=\frac{V_{xy}}{12}=\frac{12}{12}=1A$$

בענף התחתון:

$$I=\frac{V_{xy}}{6}=\frac{12}{6}=2A$$

ג. נחשב את האנרגיה האגורה בקבל השקול:

$$U=\frac{C_TV^2}{2}=\frac{2\cdot10^{-6}\cdot12^2}{2}=1.44\cdot10^{-4}J$$

ד. המטען על לוח הקבל השקול C_T שווה בערכו למטען על הלוח של כל אחד מהקבלים הטוריים במעגל, לכן:

$$q_{(C_T)} = C_T V = 2\cdot10^{-6}\cdot12 = 2.4\cdot10^{-5}C$$

נניח ש- $V_x > V_y$. לפי הנחה זו, הפוטנציאל בנקודה a גבוה מהפוטנציאל בנקודה y בשיעור:

$$V_{ay} = \frac{q_{8\mu F}}{C_{8\mu F}} = \frac{2.4\cdot10^{-5}}{8\cdot10^{-6}} = 3Volt$$

נחשב את המתח בין הנקודות b ל-y:

$$V_{by} = IR = 2\cdot4 = 8Volt$$

משתי המשוואות האחרונות מתקבל:

$$V_{ba} = 8-3 = 5Volt$$

כלומר, הפוטנציאל בנקודה b גבוה ב-$5V$ מהפוטנציאל בנקודה a.

.26

א. נבטא את הקיבול C במצב החדש שנוצר באמצעות הקיבול C_0:

$$C_0 = \varepsilon_0\frac{A_0}{d_0} \quad\Rightarrow\quad C = 2\varepsilon_0\frac{A}{d_0} = 2C_0$$

ב. המתח על הקבל אינו משתנה, כי מקור המתח שומר (בעזרת המנגנון שבו) על מתח קבוע על פני הקבל:

$$V = V_0 = \frac{q_0}{C_0}$$

ג. האנרגיה האגורה בקבל, לפני ואחרי הכנסת החומר המבודד, ניתנת בהתאמה בביטויים הבאים:

$$U_0 = \frac{C_0V_0^2}{2} = \frac{C_0}{2}\left(\frac{q_0}{C_0}\right)^2 = \frac{q_0^2}{2C_0}$$

$$U = \frac{CV^2}{2} = \frac{(2C_0)\cdot V_0^2}{2} = \frac{2C_0(q_0/C_0)^2}{2} = \frac{q_0^2}{C_0} = 2U_0$$

27. <u>הערה</u>: שאלה זו משלימה את קודמתה. כאן מטען הקבל קבוע, כי לאחר ניתוק הקבל ממקור המתח, לוחות הקבל מבודדים ומטענם אינו יכול להשתנות. (בשאלה הקודמת המתח היה קבוע, אך המטען יכול היה להשתנות).

א. התשובה לסעיף זה זהה לתשובה לסעיף 26-א'.

ב. המתח בין לוחות הקבל, לפני ואחרי הכנסת המבודד, הוא:

$$V_0 = \frac{q_0}{C_0}$$

$$q = q_0$$

$$V = \frac{q}{C} = \frac{q_0}{2C_0} = \frac{V_0}{2}$$

ג. האנרגיה האגורה בקבל, לפני ואחרי הכנסת החומר המבודד, היא:

$$U_0 = \frac{q_0^2}{2C_0}$$

$$U = \frac{q^2}{2C} = \frac{q_0^2}{2(2C_0)} = \frac{q_0^2}{4C_0} = \frac{U_0}{2}$$

.28

א. במצב שבו המפסק S_1 בלבד סגור, המעגל מנותק. במצב זה אין זרם בסוללה.
המתח על הקבלים C_1 ו-C_2 יחד הוא כמתח הדקי הסוללה, $120V$. נחשב את הקיבול השקול של הקבלים ואת המטען על הקבל השקול q_T.

$$\frac{1}{C_{1+2}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{1}{2\mu F} + \frac{1}{8\mu F} = \frac{5}{8\mu F}$$

$$\Rightarrow\quad C_T = 1.6\cdot10^{-6}F$$

$$\Rightarrow\quad q_T = C_T\cdot V = 1.6\cdot10^{-6}\cdot120 = 1.92\cdot10^{-4}C$$

מטען זה הוא המטען על כל אחד מהקבלים המחוברים בטור:

$$q_1 = q_2 = q_T = 1.92\cdot10^{-4}C$$

ב. במצב שבו שני המפסקים S_1 ו-S_2 סגורים, זורם זרם דרך הנגדים והמתח על שני הקבלים המחוברים בטור שווה למתח על הנגד השקול $R_1 + R_2$.

$$I_{BATTERY}=\frac{\varepsilon}{R_1+R_2+R_3}=\frac{120}{1000}=0.12A$$

$$V_{1+2}=R_{1+2}\cdot I=(100+100)\cdot 0.12=24V$$

בסעיף א' מצאנו את הקיבול של שני הקבלים $C_T=1.6\cdot10^{-6}F$, ולכן כאן:

$$q_1=q_2=q_T=V_{1+2}\cdot C_T=24\cdot1.6\cdot10^{-6}=3.84\cdot10^{-5}C$$

ג. כאשר שלושת המפסקים סגורים, כל קבל מחובר במקביל לנגד ודרך הסוללה זורם זרם שחושב בסעיף ב': $I=0.12A$. לכן:

$$V_1=IR_1=0.12\cdot100=12Volt$$

$$q_1=C_1\cdot V_1=2\cdot10^{-6}\cdot12=2.4\cdot10^{-5}C$$

$$V_1=V_2$$

$$q_2=C_2\cdot V_2=8\cdot10^{-6}\cdot12=9.6\cdot10^{-5}C$$

ד. כאשר המתגים S_1 ו-S_3 סגורים אין זרם בסוללה והקבל C_2 מקוצר, לכן:

$$I=0$$

$$q_2=0$$

המתח בין לוחות הקבל C_1 הוא כמתח הדקי הסוללה, במקרה זה $\varepsilon=120V$, לכן:

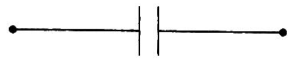
$$q_1=C_1\varepsilon=2\cdot10^{-6}\cdot120=2.4\cdot10^{-4}C$$

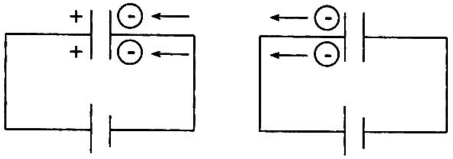
.29

א. בעת טעינת הקבל או פריקתו, האלקטרונים עוברים בתיילים ובסוללה, אך בין לוחות הקבל יש נתק, לכן אין מעבר אלקטרונים בין לוחות הקבל במישרין. בתחילה, שני המוליכים (במקרה זה, הלוחות של הקבל) שבקבל ניטרליים. הסוללה מעבירה אלקטרונים מלוח אחד למשנהו. אלקטרונים אינם עוברים במרווח שבין לוחות הקבל.

הערה: ניסוח ההסברים הוא עבור קבל לוחות, אבל התופעות הן זהות גם לקבלים אחרים, בהם למוליכים צורה הנדסית אחרת.

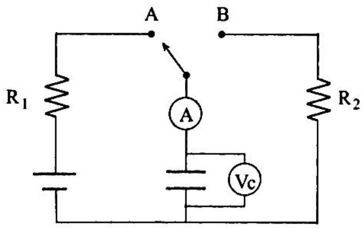
באיור מתואר מעבר האלקטרונים.





.30

א. באיור משולבים יחד מעגל טעינה ומעגל פריקה. במצב המתואר באיור, הקבל נטען דרך הנגד R_1. העברת המתג לנקודה B פורקת את הקבל דרך הנגד R_2.



כשהקבל נטען, עוצמת הזרם במשך זמן הטעינה קְטֵנה ולבסוף מתאפסת כשהמתח על הקבל משתווה למתח הדקי הסוללה. מתח הדקי הסוללה V הוא סכום המתחים על הקבל V_C והמתח על הנגד V_{R_1}. כלומר:

$$V=V_C+V_R$$

לפי חוק אוהם, המתח על הנגד הוא:

$$V_{R_1}=I\cdot R_1 \quad \text{לכן} \quad I=\frac{V-V_C}{R_1}.$$

המתח על הקבל, V_C, גדֵל (כי בזמן הטעינה המטען הנאגר בקבל גדֵל) לכן $I_{\text{טעינה}}$ קטֵן, עד שמתאפס כאשר $V = V_C$.

כשהקבל נפרק ממטענו, מתקיים:

$$V_C = V_{R_2} = I \cdot R_2 \quad \Rightarrow \quad I = \frac{V_C}{R_2}$$

כשהקבל נפרק, הקבל מאבד ממטענו. לכן, המתח על הקבל קטֵן, ועוצמת הזרם קטֵנה.

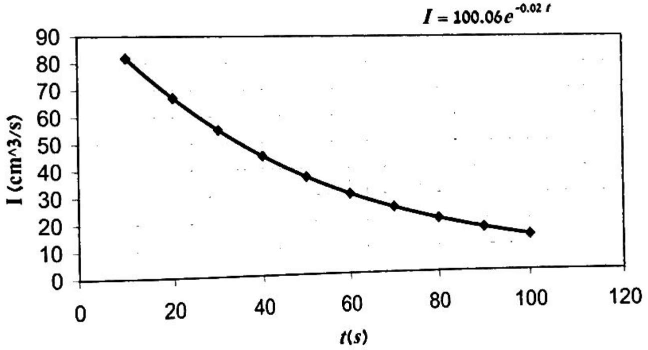
ב. מתח הדקי הסוללה ניתן על ידי הביטוי $V = \varepsilon - Ir$. בזמן הטעינה, עוצמת הזרם I, קטֵנה עד ל-0. לכן, מתח ההדקים גדֵל עד שמשתווה לכא"מ הסוללה - ε.

31. בהחלט כן. מתח הנגד מקיים בכל רגע את הקשר $V_R = IR$. עוצמת הזרם משתנה וכתוצאה מכך משתנה גם המתח על הנגד.

32.

א.

קצב זרימת המים כתלות בזמן



ב. כפי שניתן לראות מן המשוואה שעל הגרף, המתארת את קו המגמה של הפונקציה $I(t)$, עוצמת זרם המים בתחילה היתה $100\ cm^3/s$.

ג. השטח הכלוא בין הגרף לצירים מייצג את כמות המים שזרמו מהכלי (או את שינוי בכמות המים שבכלי).

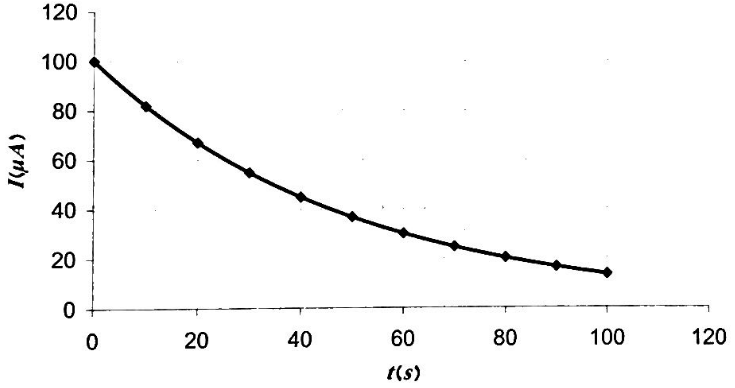
ד. כל משבצת מייצגת כמות של $40cm^3$ של מים שזרמו מהכלי. לאחר שממשיכים את קו הגרף עד הצירים, מספר המשבצות מתחת לגרף הוא כ-115, והן מייצגות $4600cm^3$ של מים.

ה. הזמנים בהתאמה הם: $35s$, $70s$, כ-$105s$. (הקורא מוזמן להעתיק את הגרף ולהמשיך את קו המגמה).

ו. כעבור $35s$ עוצמת הזרם קטנה למחצית מעוצמת הזרם ההתחלתית. כעבור 35 שניות נוספות, עוצמת הזרם קטנה לרבע מהערך ההתחלתי וכך הלאה. בהכללה: בכל פרק זמן של 35 שניות, עוצמת הזרם פוחתת למחצית מערכה (של העוצמה שהיתה בתחילת פרק הזמן הנדון).

33.

א. עוצמת הזרם בפריקת הקבל כתלות בזמן



ב. <u>הערה</u>: כשמעריכים את השטח מתחת לגרף יש לשים לב היטב ליחידות המידה של הצירים. במקרה זה ממדי משבצת הם: בציר הזמן $4s$ ובציר עוצמת הזרם $20 \cdot 10^{-6}A$. לכן, שטח כל משבצת מייצג מטען של $(20 \cdot 10^{-6}A) \cdot (4s) = 80 \cdot 10^{-6}C$ או $80\mu C$.

השטח הכלוא בין הגרף לצירים מיוצג על ידי 58 משבצות (מלבניות) לערך[2]. לכן מטען הקבל הוא כ- $58x80 = 4640\ \mu C$.

ג. $q = CV = 5\cdot 10^{-4}\cdot 10 = 5\cdot 10^{-3}C = 5000\mu C$

בהתחשב במגבלות הנובעות משיטת ספירת המשבצות מתחת לגרף, מידת ההתאמה בין התוצאות סבירה.

ד. בתרגיל הנוכחי, ערך זה הוא כ-82%; למשל, היחס בין שתי מדידות עוקבות הוא: $0.82 \approx 67/81.9 \approx 81.9/100$; ראה טבלה בספר הלימוד.

ה. נחשב את קבוע הזמן ואת היחס בין עוצמת הזרם (כפי שניתן לראותם בגרף) בזמן $t = \tau$, לבין עוצמתו בזמן $t = 0$:

$$\tau = RC = 10^5\cdot 500\cdot 10^{-6} = 50s$$

$$\frac{I_\tau}{I_0} \approx \frac{36.8\mu A}{100\mu A} = 37\%$$

ו. נחשב את יחס עוצמות הזרמים עבור 3 זוגות ערכים שפער הזמן ביניהם הוא $t = \tau = 50s$:

$$\frac{I_{(t=100s)}}{I_{(t=50s)}} = \frac{13.5}{36.8} = 0.367$$

$$\frac{I_{(t=80s)}}{I_{(t=30s)}} = \frac{20.2}{54.9} = 0.368$$

$$\frac{I_{(t=60s)}}{I_{(t=10s)}} = \frac{30.1}{81.9} = 0.368$$

לפי חישובים אלה רואים שהטענה נכונה.

ז. נחשב את עוצמת הזרם בזמן $t = 110s$. לשם כך, על פי התוצאה שקיבלנו בסעיף ד', נחשב 82% מעוצמת הזרם בזמן $t = 100s$:

$$\frac{I_{(110s)}}{I_{(100s)}} = 0.82 \quad \Rightarrow \quad I_{(110s)} = 13.5\cdot 0.82 = 11.07\mu A$$

תוצאה זו עומדת בהתאמה עם הגרף. (לבדיקת התוצאה, הקורא מוזמן להעתיק את הגרף ולהמשיך את קו המגמה לזמן $t > 100s$).

[2] יש להעריך, ככל שניתן, את "חלקי המשבצות" שנחתכות על ידי הגרף.

ח. נחשב את הזמן עד שמטען הקבל פוחת ל- 1% ממטענו ההתחלתי:

$$q = q_0 e^{-\frac{t}{RC}}$$

$$\frac{q_0}{100} = q_0 e^{-\frac{t}{RC}}$$

$$\ln 0.01 = -\frac{t}{RC}$$

$$t = -RC\cdot \ln 0.01 = (-4.605)\cdot(10^5\cdot 500\cdot 10^{-6})$$

$$t = 230.26s$$

נחשב פי כמה גדול זמן זה מהזמן τ:

$$\frac{t}{\tau} = \frac{230.25}{50} = 4.6$$

כלומר, אחרי זמן 4.6τ, מטען הקבל קטן מאחוז אחד ממטענו ההתחלתי.

ט. מפתרון הסעיף הקודם ניתן להסיק שמטען הקבל קטן מ-1%. נציב $t = 5\tau$ ונחשב את מטען הקבל בזמן זה, יחסית למטענו ההתחלתי:

$$q = q_0 e^{-\frac{t}{RC}}$$

$$q = q_0 e^{-\frac{5RC}{RC}} = q_0 e^{-5}$$

$$\frac{q}{q_0} = e^{-5} = 6.7\cdot 10^{-3}$$

$$q = 0.0067 q_0$$

$$q = 0.67\%(q_0)$$

לרוב הצרכים המעשיים, אחרי פרק זמן $t = 5\tau$ הקבל יכול להיחשב כפרוק ממטענו.

34.

א. אם גררת הנגד המשתנה נשארת במקומה, עוצמת הזרם דועכת "דעיכה מעריכית". כדי לשמור על עוצמת זרם קבועה במשך זמן פריקת הקבל, יש להקטין ברציפות את התנגדות מעגל הפריקה. לשם כך יש להזיז את הגררה (ברציפות) שמאלה.

ב. השטח מתחת לגרף מייצג את מטענו של הקבל לפני שהחלה פריקתו. לכן:

$$q = It \quad \Rightarrow \quad I = \frac{q}{t} = \frac{CV}{t} = \frac{100\cdot10^{-6}\cdot12}{10} = 1.2\cdot10^{-4}A$$

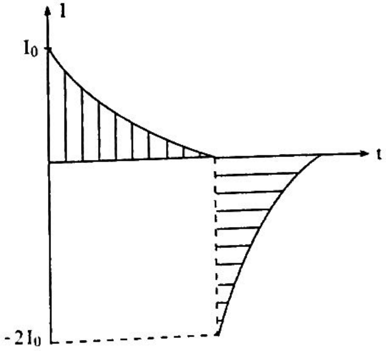
ג. הנגד במעגל מקיים את חוק אוהם. נציב את ערך המתח ההתחלתי ונקבל:

$$R = \frac{V_0}{I} = \frac{12}{1.2\cdot10^{-4}} = 10^5\Omega = 100k\Omega$$

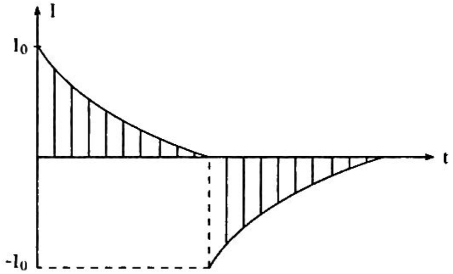
ערך זה של הנגד מתקבל כאשר במעגל משתתף כרבע מערכו הכולל של הנגד המשתנה (ובהתאמה, הגררה מוצבת כך שכרבע מאורך הנגד משתתף במעגל).

35.

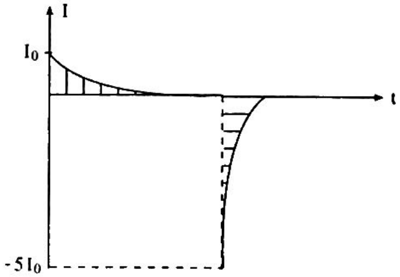
א. ניתן לראות שעוצמת זרם הפריקה ההתחלתית גדולה פי 2 מהעוצמה ההתחלתית של זרם הטעינה כי $R_2 = \frac{1}{2}R_1$. השטחים בין הגרפים לציר הזמן שווים ולכן דעיכת זרם הפריקה מהירה יותר.



ב. אם הנגדים במעגל הטעינה והפריקה שווים בגודלם, הגרפים סימטריים. העוצמה ההתחלתית של זרם הפריקה שווה בגודלה לעוצמה ההתחלתית של זרם הטעינה. השטחים בין הגרפים לציר הזמן שווים.



ג. במקרה זה, הנגד במעגל הפריקה קטן פי 5 מהנגד במעגל הטעינה. עוצמת הזרם ההתחלתי במעגל הפריקה גדולה פי 5 מעוצמת הזרם ההתחלתי במעגל הטעינה. השטחים בין הגרפים לציר הזמן שווים.



36.

א. בעת סגירת המתג, הקבל אינו מכיל כל מטען. עוצמת הזרם ההתחלתית מקיימת את הקשר הבא:

$$I=\frac{\varepsilon}{R_1+R_2}=\frac{4}{1000}=4\cdot10^{-3}A$$

ב. הנגדים מחוברים בטור. לכן עוצמת הזרם דרכם שווה.

ג. לפי הגדרת קבוע הזמן, τ מציין את הזמן שחולף עד אשר עוצמת הזרם דועכת לערך:

$$I(\tau)=\frac{I_0}{e}=\frac{I_0}{2.718}\approx I_0\cdot37\%=\frac{4\cdot10^{-3}\cdot37}{100}=1.48\cdot10^{-3}A$$

כפי שניתן לראות מהגרף, ובהתחשב בתוצאה שהתקבלה בסעיף א', ערכו של זרם זה מתקבל כעבור $t\approx5s$.

ד. נמצא את קיבולו של הקבל מתוך הקשר $\tau=RC$:

$$C=\frac{\tau}{R_T}=\frac{5}{R_1+R_2}=\frac{5}{1000}=5\cdot10^{-3}F=5mF$$

ה. נמצא את מטענו של הקבל. טרם פריקתו היה מתח הקבל כמתח הדקי הסוללה:

$$q=CV=C\varepsilon=5\cdot10^{-3}\cdot4=2\cdot10^{-2}C$$

ו. בזמן טעינת הקבל, הסוללה מעבירה מטען מלוח אחד של הקבל ללוח השני. לפיכך, המטען q שמצטבר על כל אחד מלוחות הקבל שווה בערכו למטען שעבר בסוללה.

ז. נחשב את האנרגיה שהסוללה מספקת בתהליך הטעינה:

$$E_{nergy(BATT)}=\varepsilon q=4\cdot2\cdot10^{-2}=8\cdot10^{-2}J$$

ח. האנרגיה האגורה בקבל בתום הטעינה היא:

$$U=\frac{CV^2}{2}=\frac{5\cdot10^{-3}\cdot4^2}{2}=4\cdot10^{-2}J$$

ט. ההבדל בין תוצאות שני הסעיפים האחרונים נובע מאובדן אנרגיה בזמן הטעינה. אנרגיה זו מתבטאת בהתחממות המוליכים שדרכם מתבצעת הטעינה (וגם בהתחממות הסוללה).

י. יחס האנרגיות הוא $1:2=50\%$.

37.

א. אמפרמטר אידיאלי מאופיין בכך שהתנגדותו הפנימית היא אפס (בפועל היא זניחה ביחס ליתר הנגדים במעגל נתון).

ב. אחרי זמן רב, מתח הקבל הוא כמתח הדקי הסוללה, שהוא במקרה זה, כערך הכא"מ של הסוללה - $V_C=\varepsilon=24Volt$.

מהרגע שהקבל נטען, הזרם במעגל מתאפס, כי מתח הקבל משתווה למתח הסוללה.

ג. לפי חוק אוהם, במעגל הפריקה מתקיים:

$$I_{A_2}=\frac{\varepsilon}{R_2}=\frac{24}{2000}=1.2\cdot10^{-3}=12mA$$

ד. הנגדים מקיימים את חוק אוהם. העובדה שעוצמת הזרם אינה קבועה במעגל, קשורה בכך שמטען הקבל משתנה בעת הטעינה או בעת הפריקה. לכן, המתח על הנגד משתנה ללא הרף וכתוצאה מכך משתנה באותה מידה עוצמת הזרם; מצב זה עומד בהתאמה מלאה עם חוק אוהם.

ה. לפי פתרון סעיף ג', עוצמת הזרם אינה מתאימה לזרם באמפרמטר A_2 ולכן מתבקשת המסקנה שהגרף מתאר את הזרם באמפרמטר A_1, כלומר את זרם הטעינה.

ו. נחשב את ערך הקיבול. על פי הגרף, עוצמת הזרם דועכת לערך $0.06A$, שהוא כ-37% מערך הזרם ההתחלתי תוך $\tau\approx3s$. לכן:

$$\tau=RC \qquad \Rightarrow C=\frac{\tau}{R_1}=\frac{\tau}{V_1/I_{1MAX}}=\frac{3}{24/0.016}=2\cdot10^{-3}F=2mF$$

ז. מטען הקבל C_2 הוא $q_2=C_2\cdot\varepsilon$ והוא יהיה קטן יותר ממטען הקבל C. מטען זה מיוצג על ידי השטח בתרשים ב'. לכן, גם שטח זה יהיה קטן יותר.

38.

א. על פי התיאור המופיע בשאלה ניתן להבין שהקבל C_1 טעון. לכן אין זרם בנגד R_3. עוצמת הזרם במעגל מקיימת את המשוואה הבאה:

$$I=\frac{\varepsilon}{R_1+R_2+R_4}=\frac{12}{2+2+2}=2A$$

זרם זה זורם גם בנגד R_1.

ב. כשהמתג מחובר לנקודה A, המתח על הקבל C_1 מקיים את המשוואה הבאה:

$$V_{C_1} = \varepsilon - IR_1 = 12 - 2\cdot 2 = 8Volt$$

$$q_{C_1} = C_1 V = 3\cdot 10^{-6}\cdot 8 = 2.4\cdot 10^{-5}C$$

הקבל C_2 אינו טעון, ולכן מתקיים:

$$V_{C_1} = 0$$

$$q_{C_1} = 0$$

ג. על פי הנימוק בסעיף א', עוצמת הזרם בנגד R_1 היא $2A$.

ד. בנגד R_3 אין זרם. לכן, הפרש הפוטנציאלים על נגד זה הוא 0. על שני הקבלים C_1 ו-C_2, המחוברים ביניהם בטור, המתח זהה למתח על הנגד R_2, לכן:

$$V_{(R_2)} = IR_2 = 2\cdot 2 = 4Volt$$

$$\frac{1}{C_{1+2}} = \frac{1}{3} + \frac{1}{4} = \frac{7}{12} \quad \Rightarrow \quad C_{1+2} = \frac{12}{7} = 1.71\mu F$$

$$q_{C_{1+2}} = C_{1+2}\cdot V = 1.71\cdot 10^{-6}\cdot 4 = 6.86\cdot 10^{-6}C = 6.86\mu C$$

זהו המטען על הקבל השקול של שני הקבלים וגם על כל אחד מהקבלים.

ה. כפי שהוסבר בסעיף הקודם, לנגד R_3 אין השפעה על הזרם במעגל ההיקפי. (ראוי להעיר שנגד זה משפיע על משך זמן הטעינה של הקבלים).

ו. הקיבול של הקבל C_2 גדל פי 2, וערכו $8\mu F$. עוצמת הזרם במעגל ההיקפי אינה משתנה וכך גם המתח על הנגד R_2. על פי השיקולים שבסעיף הקודם מתקבל:

$$V_{(R_2)} = IR_2 = 2\cdot 2 = 4Volt$$

$$\frac{1}{C'_{1+2}} = \frac{1}{3} + \frac{1}{8} = \frac{11}{24} \quad \Rightarrow \quad C'_{1+2} = \frac{24}{11} = 2.18\mu F$$

$$q_{C_1} = q_{C_2} = q_{C_{1+2}} = C'_{1+2}\cdot V = 2.18\cdot 10^{-6}\cdot 4 = 8.73\cdot 10^{-6}C = 8.73\mu C$$

.39

א. היות שגם הטעינה וגם הפריקה מתבצעות דרך אותו נגד R במעגל, ערכי עוצמות הזרמים ההתחלתיים זהים בשני המקרים; לא ניתן לדעת אם מדובר בגרף המתאר טעינה או פריקה של הקבל.

ב. גרף מתח הקבל כתלות בעוצמת הזרם במעגל מתאים <u>לפריקת הקבל</u>. כאשר מטען הקבל גדול, המתח על פניו גדול (ערך זה נמדד על ידי הוולטמטר במעגל!), לכן עוצמת הזרם (במעגל הפריקה) גדולה. במצב של טעינה, ככל שמתח הקבל גדול יותר, עוצמת הזרם קטנה יותר.

ג. באיור ג', שיפוע הגרף מייצג על פי חוק אוהם את התנגדות הנגד במעגל. ערך שיפוע הגרף הוא:

$$R = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{(3-0)Volt}{(1.5-0)\cdot 10^{-3}A} = 2\cdot 10^{3}\Omega$$

<u>זהירות, מכשלה!</u>

יחידות שיפוע הגרף נקבעות על ידי היחידות של צירי הגרף. רבים שוגים בתרגילים דומים, השגיאה הרווחת בתרגיל זה היא התשובה $R = 2\Omega$. הדבר מראה שלא נלקחו בחשבון יחידות עוצמת הזרם: מיליאמפר=$10^{-3}A$.

ד. בעזרת איור ב', נבדוק תוך כמה זמן פחתה עוצמת הזרם ל- $1/e$ מערכה ההתחלתי:

$$I_\tau = \frac{I_0}{e} = \frac{1.5mA}{2.718} = 0.55mA$$

עוצמת זרם זו מתאימה לזמן $t = \tau \approx 1s$.

ה. קבוע הזמן מקיים את הקשר $\tau = RC$. לכן:

$$C = \frac{\tau}{R} = \frac{1}{2\cdot 10^{3}} = 5\cdot 10^{-4}F = 500\mu F$$

.40

א. עוצמת הזרם, בתחילת תהליך הפריקה, מתקבלת על ידי הביטוי:

$$I_0 = \frac{V_0}{R} = \frac{300}{500} = 0.6A$$

ב. נציב את הזמנים הנתונים בשאלה בביטוי המבטא את עוצמת זרם הפריקה:

$$I = I_0 e^{-\frac{t}{RC}} \qquad I_0 = 0.6A$$

$$I(2s) = 0.6e^{\frac{-2}{500\cdot 0.01}} = 0.40A \quad ; \quad I(4s) = 0.6e^{\frac{-4}{500\cdot 0.01}} = 0.27A$$

$$I(6s) = 0.6e^{\frac{-6}{500\cdot 0.01}} = 0.18A \quad ; \quad I(8s) = 0.6e^{\frac{-8}{500\cdot 0.01}} = 0.12A$$

ג. נחשב את הערך I_0/e :

$$I=\frac{I_0}{e}=\frac{0.6}{2.718}=0.22A$$

על פי התוצאות שהתקבלו בסעיף ב', עוצמת זרם זו מתקבלת בפרק הזמן t, המקיים: $4s<t<6s$.

ד. נחשב את קבוע הזמן על פי הגדרתו המתמטית:

$$\tau=RC=0.5\cdot10^3\cdot10\cdot10^{-3}=5s$$

ה. קבוע הזמן מבטא את משך הזמן הדרוש לכך שקבל טעון המתפרק ממטענו במעגל פריקה יכיל כמות מטען q_0/e, כאשר q_0 הוא מטענו בתחילת תהליך הפריקה. ערך זה הוא כ- 36.7% מערך המטען ההתחלתי.

41.

א. מתח הקבל הוא כמתח הדקי הסוללה, וכאשר $I=0$, מתח ההדקים שווה בערכו לכא"מ הסוללה. על כן, מתח ההדקים שלה הוא:

$$V_{AB}=\varepsilon=24Volt$$

ב. מטען הקבל הוא:

$$q=CV=5\cdot10^{-3}\cdot24=0.12C$$

ג. עוצמת הזרם בתחילת הפריקה ניתנת לחישוב באמצעות חוק אוהם:

$$I_0=\frac{V_0}{R}=\frac{\varepsilon}{R}=\frac{24}{10^4}=2.4\cdot10^{-3}A=2.4mA$$

ד. קבוע הזמן של המעגל הוא:

$$\tau=RC=10^4\cdot5\cdot10^{-3}=50s$$

ה. עוצמת הזרם בזמן $t=\tau$ היא:

$$I=\frac{I_0}{e}=\frac{2.4\cdot10^{-3}}{2.718}=8.83\cdot10^{-4}A$$

ו. נחשב את כמויות האנרגיות האגורות בקבל בתחילת תהליך הפריקה וכעבור פרק הזמן τ:

$$U_0=\frac{q_0^2}{2C}=\frac{0.12^2}{2\cdot5\cdot10^{-3}}=1.44J$$

$$U_\tau=\frac{q_\tau^2}{2C}=\frac{(q/e)^2}{2C}=\frac{(0.12/2.718)^2}{2\cdot5\cdot10^{-3}}=0.195J$$

$$\frac{U_\tau}{U_0}=\frac{0.195}{1.44}=0.135=13.5\%$$

הליך הפתרון לתרגילים 42-43 זהה לחלוטין להליך פתרון תרגיל 41, לכן, נשאיר תרגילים אלה לתרגול נוסף על פי הצורך.

הקדמה לפרקים 7,8

דגשים מתוך הסילבוס החדש

שדות מגנטיים (2 שעות)

א. השדה המגנטי הוא גודל וקטורי המקיים את עיקרון הסופרפוזיציה, בהתאם לכלל החיבור הווקטורי. כיוון השדה המגנטי בנקודה זהה לכיוון מחט מגנטית באותה נקודה.

ב. אפשר לתאר שדה מגנטי באמצעות קווי שדה.

ג. קווי השדה המגנטי הם קווים סגורים. מנגד, קווי השדה האלקטרוסטטי מתחילים במטען חיובי ומסתיימים במטען שלילי או באינסוף.

השפעת השדה המגנטי על זרם, עוצמת השדה המגנטי (3 שעות)

א. רצוי לבצע ניסוי במאזניי זרם כדי להדגים את הכוח שהשדה המגנטי מפעיל על זרם. הניסוי מאפשר לחקור את תלות הכוח בפרמטרים השונים: עוצמת השדה, עוצמת הזרם והזווית שבין כיוון השדה וכיוון הזרם. רצוי להדגים הטיית קרן אלקטרונים באמצעות מגנט.

ב. יש להדגיש שכיוון הכוח המגנטי מאונך לכיוון השדה המגנטי ולכיוון תנועת המטענים.

הקשר בין שדה מגנטי למקורותיו (5 שעות)

א. רצוי להתייחס לזרם חשמלי כאל אחד ממקורות השדה החשמלי.

ב. ניסוי עם גלוונומטר טנגנטי מדגים את העובדה שהשדה המגנטי הוא וקטור.

ג. כדאי להדגים מצפן רכינה (מצפן אנכי) ולהסביר מנין נובעת הרכינה. יש להסביר שהקוטב הצפוני הגיאוגרפי הוא למעשה קוטב דרומי מגנטי.

ד. אין צורך להשתמש בחוק אמפר ובחוק ביו-סבר בצורתם הכללית לחישוב השדה במרכז סילונית ובמרכז כריכה מעגלית. אימות נוסחאות אלה ייעשה בניסוי.

כוח בין זרמים מקבילים והגדרת האמפר (2 שעות)

ה"אמפר", היחידה של עוצמת הזרם החשמלי, מוגדרת בעזרת הכוח הפועל בין שני תיילים מקבילים נושאי זרם. יחידת האמפר היא יחידה בסיסית בשיטת ה-SI המקובלת.

הכוח הפועל על מטען הנע בשדה מגנטי (4 שעות)

א. שדה מגנטי קבוע בזמן מפעיל כוח על מטען נע בניצב לכיוון תנועתו. לכן, השדה המגנטי אינו מבצע עליו עבודה. בשלב הראשון יש לדון בשדה מגנטי קבוע בזמן.

ב. יש להדגיש שמטען הנכנס לשדה מגנטי בניצב לכיוון השדה, נע בתנועה מעגלית כי הכוח המגנטי קבוע בגודלו וכיוונו מאונך לכיוון המהירות.

ג. בספר לימוד זה תרגילים 10-11 הוקדשו להשוואה בין הכוח בחשמלי לכוח המגנטי הפועלים על מטען חשמלי.

ד. קיימת נטייה להדגיש במיוחד תנועה במסלול מעגלי בשדה מגנטי. כדאי לנתח תנועה בורגית כדי למנוע את הרושם כאילו תנועה במסלול מעגלי היא התנועה הבלעדית האפשרית בשדה מגנטי.

יישומים של כוח מגנטי (3 שעות)

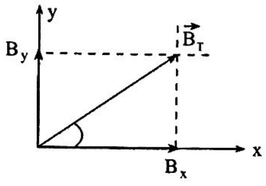
ניתן להזכיר מכשירים פשוטים כמו מנוף אלקטרומגנטי או רשם זמן המוכר מלימודי מכניקה. יישומים יותר מתקדמים הם ציקלוטרון, ספקטרוגרף מסות ומד זרם בעל סליל מסתובב.

לפרק 7 – השדה המגנטי

.1

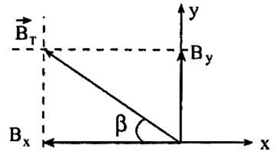
א. המצפן יפנה לכיוון וקטור עוצמת השדה השקול, $\vec{B}_T$. כיוונו של וקטור זה ביחס לציר x ניתן על ידי הביטוי הבא:

$$\tan\alpha = \frac{B_y}{B_x} = \frac{0.3}{0.5} = 0.6 \quad \Rightarrow \quad \alpha = 30.96°$$



המצפן יפנה לכיוון שיוצר זווית של $30.96°$ עם ציר x כמתואר באיור.

ב. באותו אופן, במצב זה יפנה המצפן לכיוון המתואר באיור.

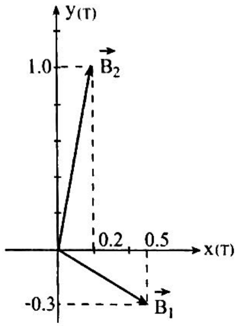


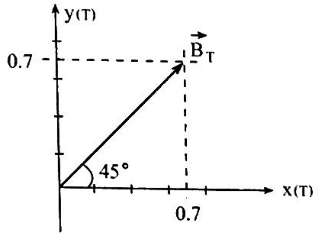
$$\tan\beta = 0.6 \quad \Rightarrow \quad \beta = 30.96°$$

במקרה זה, המצפן יפנה לכיוון שיוצר זווית של $30.96°$ עם ציר ה-x השלילי, כמתואר באיור.

ג. שקול הווקטורים בכיוון x הוא: $\sum B_x = B_{1x} + B_{2x} = 0.5T + 0.2T = 0.7T$

ובכיוון y הוא: $\sum B_y = B_{1y} + B_{2y} = -0.3T + 1T = 0.7T$





היות והערכים המוחלטים של רכיבי הווקטור בכיוון x ובכיוון y שווים בגודלם, השקול פונה בזווית של $45°$ בין ציר x לציר y.

.2 אם האלקטרון אינו מוסח מכיוונו המקורי בתנועתו בשדה מגנטי, ניתן להסיק שכיוון וקטור השדה המגנטי מקביל לכיוון מהירות האלקטרון בכניסתו לשדה.

.3

א. ייתכן שהחלקיק נע בשדה מגנטי אחיד בתנאי שמהירותו מקבילה לכיוון וקטור עוצמת השדה המגנטי.

ב. חלקיק טעון אינו יכול לנוע בתנועה שוות מהירות בשדה חשמלי אלקטרוסטטי, כי תמיד פועל עליו כוח חשמלי שונה מאפס.

.4 חלקיק מספר 2 הוא ניטרלי לכן, כיוונו נשמר. על פי כלל יד שמאל, סימן המטען של החלקיק המסומן "1" חיובי וזה של חלקיק "3" שלילי.

.5 כדי לפתור תרגיל זה יש להתחשב בעובדה שמדובר בחלקיק חיובי ולנהוג באופן הבא:

- כוון את אצבעות יד שמאל בכיוון וקטור המהירות $\vec{v}$.
- כוון את האגודל הפרוש של יד שמאל בכיוון וקטור הכוח המגנטי $\vec{F}$.
- וקטור השדה המגנטי $\vec{B}$ פונה לתוך כף היד.

על פי כלל יד שמאל, כיוונו של וקטור השדה המגנטי הוא:

א. בכיוון $(-z)$ ב. בכיוון $(+x)$ ג. בכיוון $(-z)$ ד. בכיוון $(-z)$.

6. על פי כלל יד שמאל ניתן לדעת שמטענם של החלקיקים חיובי.

7.

א. סמוך לפני הארץ, כוח הכובד הפועל על הפרוטון הוא:

$$F_G = m_p \cdot g = 1.67\cdot10^{-27}\cdot 10 = 1.67\cdot 10^{-26}\,N$$

כוח הכובד מכוון למרכז כדור הארץ.

ב. נחשב את גודל הכוח החשמלי הפועל על הפרוטון:

$$F_E = E\cdot(+e) = 100\cdot1.6\cdot10^{-19} = 1.6\cdot10^{-17}\,N$$

הכוח החשמלי על הפרוטון מכוון גם הוא למרכז כדור הארץ.

ג. נחשב את הכוח המגנטי הפועל על הפרוטון:

$$F_B = B\cdot(+e)\cdot v = 50\cdot10^{-6}\cdot1.6\cdot10^{-19}\cdot5\cdot10^{6} = 4\cdot10^{-17}\,N$$

על פי כלל יד שמאל, הכוח המגנטי על הפרוטון מנוגד לכיוונו של כוח הכובד הפועל עליו.

ד. <u>מסקנה</u>: כוח הכובד הפועל על הפרוטון זניח ביחס לכוחות החשמליים ולכוחות המגנטיים, שהם בעלי סדר גודל דומה במקרה זה.

8.

א. <u>לא נכון</u>, כי השדה המגנטי משפיע על כיוון המהירות אך לא על גודלה. לכן, הוא אינו משפיע על האנרגיה הקינטית. הכוחות המגנטיים מאונכים למהירות המטען הנע, לכן, הם אינם מבצעים עליו עבודה.

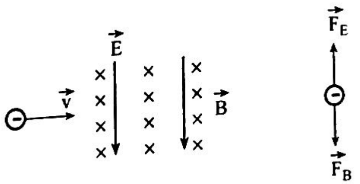
ב. <u>נכון</u>; ראה נימוק לסעיף א'.

ג. <u>לא נכון</u>; ראה פתרון תרגילים 3 ו-4.

ד. <u>נכון</u>; במקרה זה הכוח המגנטי הפועל על החלקיק שונה מאפס, כי מהירותו אינה מקבילה לווקטור עוצמת השדה.

9. אלקטרון נע בקו ישר, אם הכוח החשמלי והמגנטי שווי גודל ומנוגדי כיוון. מצב זה עשוי להתקבל אם השדה המגנטי מאונך לשדה החשמלי והאלקטרון נכנס בניצב לשני השדות, כמתואר באיור.

החיצים מראים את השדה החשמלי וה-"X"-ים את כיוון השדה המגנטי.



אם מתקיים:

$$F_B = F_E \quad\Rightarrow\quad Bev = Ee \quad\Rightarrow\quad v = \frac{E}{B}$$

האלקטרון נע בקו ישר, בתנועה שוות מהירות.

קיימת אפשרות נוספת בה שילוב של שדה חשמלי ושדה מגנטי מאפשרים לאלקטרון לנוע בקו ישר. אם שלושת הווקטורים $\vec{B},\vec{E},\vec{v}_e$ מקבילים זה לזה, האלקטרון ינוע בקו ישר, כי במצב זה השדה המגנטי אינו משפיע על מהירות האלקטרון. במקרה זה, השדה החשמלי מאיץ את האלקטרון אך אינו משנה את כיוון מהירותו.

10. כאשר פרוטון נכנס במאונך לווקטור עוצמת השדה המגנטי, לתחום שקיים בו **שדה מגנטי אחיד**, אז:

כיוון וקטור המהירות	משתנה
גודל וקטור המהירות	אינו משתנה
האנרגיה הקינטית	אינה משתנה
מסלול הפרוטון	מעגל
כיוון התאוצה	משתנה
גודל וקטור התנע של הפרוטון	אינו משתנה
כיוון וקטור התנע של הפרוטון	משתנה

11. כאשר פרוטון נכנס במאונך לווקטור עוצמת השדה החשמלי לתחום שקיים בו **שדה חשמלי אחיד**, אז:

כיוון וקטור המהירות	משתנה
גודל וקטור המהירות	משתנה
האנרגיה הקינטית	משתנה
מסלול הפרוטון	פרבולה
כיוון התאוצה	אינו משתנה
גודל וקטור התנע של הפרוטון	משתנה
כיוון וקטור התנע של הפרוטון	משתנה

12. כיוון הכוח המגנטי נקבע על פי כלל יד שמאל.

- מקרה a: הכוח המגנטי פונה <u>לתוך הדף</u> וגודלו הוא:

$$F = Bqv = 0.4\cdot3\cdot10^{-9}\cdot5\cdot10^{6} = 6\cdot10^{-3}\,N$$

- מקרה b: על החלקיק לא פועל כוח מגנטי.
- מקרה c: הכוח המגנטי פונה <u>החוצה מהדף</u> וגודלו:

$$F = Bq(v\cdot\cos\alpha) = 0.4\cdot3\cdot10^{-9}\cdot5\cdot10^{6}\cdot\cos30^\circ \approx 5.2\cdot10^{-3}\,N$$

- מקרה d: הכוח המגנטי פונה <u>לתוך הדף</u>. גודל הכוח הוא כמו במקרה c, $5.2\cdot10^{-3}N$.

13. קווי שדה חשמליים או מגנטיים אינם יכולים להצטלב. הצטלבות קווי שדה, משמעותה קיום שני כיוונים שונים לכוח השקול הפועל על חלקיק טעון בנקודת ההצטלבות של קווי השדה. דבר זה אינו אפשרי.

14.

א.

- בחדר 1: אין שדה מגנטי; החלקיק נע בקו ישר.
- בחדר 2: כיוון השדה המגנטי הוא החוצה מהדף, על פי כלל יד שמאל.
- בחדר 3: כיוון השדה המגנטי הוא החוצה מהדף, על פי כלל יד שמאל.
- בחדר 4: כיוון השדה המגנטי הוא לתוך הדף, על פי כלל יד שמאל.

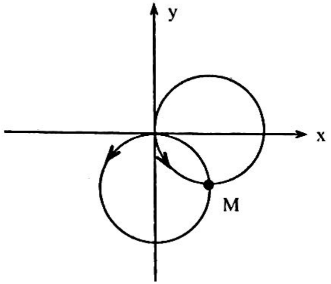
ב. גודל מהירות הפרוטון אינו משתנה בתנועתו בשדות מגנטיים. על כן מהירות הפרוטון בצאתו מהמבוך היא v.

ג. משפט 3 נכון. הפרוטון נע בקו ישר ויתכן שתנועתו מואצת.

15.

א. כדי שהפרוטון יפגע במטרה, כיווני השיגור האפשריים הם: $(-x)$ ו-$(-y)$. מסלולים מעגליים אלה בלבד, מקיימים שני תנאים הכרחיים בשאלה: חוצים את הנקודה M, ומשיקים לווקטור המהירות בראשית הצירים.

ב. מצורף איור המתאר את המסלולים של הפרוטון.



16. נחשב את הכוח החשמלי בין הפרוטון לבין האלקטרון לפי חוק קולון:

$$F_E = \frac{ke^2}{r^2} = \frac{9\cdot10^{9}\left(1.6\cdot10^{-19}\right)^2}{\left(0.53\cdot10^{-10}\right)^2} = 8.20\cdot10^{-8}\,N$$

נחשב את הכוח המגנטי שפועל על האלקטרון. הכוח הוא מקסימלי כאשר האלקטרון נע בניצב לשדה המגנטי:

$$F_B = Bev = 0.1\cdot1.6\cdot10^{-19}\cdot2.2\cdot10^{6} = 3.52\cdot10^{-14}\,N$$

היחס בין הכוח החשמלי לבין הכוח המגנטי הוא:

$$\frac{F_E}{F_B} = \frac{8.202\cdot10^{-8}}{3.52\cdot10^{-14}} = 2.33\cdot10^{6}$$

17. כיווני הכוחות נקבעים על פי כלל יד שמאל.

- גודל הכוח הפועל על המטען בקודקוד a הוא: $F = Bqv$ וכיוונו $(-x)$.
- גודל הכוח הפועל על המטען בקודקוד b הוא: $F = Bqv$ וכיוונו מ-c ל-a.
- הכוח הפועל על המטען בקודקוד c הוא: $F = 0$.
- גודל הכוח הפועל על המטען בקודקוד d הוא: $F = Bqv$ בכיוון $(-x)$.
- גודל הכוח הפועל על המטען בקודקוד e הוא: $F = Bqv$ וכיוונו z.
- גודל הכוח הפועל על המטען בקודקוד f הוא: $F = Bqv\cdot\cos45^\circ$ וכיוונו z. נימוק:

במקרה זה יש לפרק את וקטור המהירות v לשני רכיבים: v_x ו-v_y. הכוח המגנטי נובע רק מהרכיב הניצב לשדה המגנטי $v_x = v\cos\alpha = v\cos 45°$.

18. מנוסח השאלה ניתן להבין שעוצמת השדה המגנטי הארצי זניחה. ניתן להסיק שהכוח המגנטי הפועל על החלקיק שווה בגודלו ומנוגד בכיוונו לכוח הכובד הפועל על החלקיק. הכוח המגנטי מכוון כלפי מעלה. לכן, כיוון עוצמת השדה המגנטי במקרה המתואר הוא מערבה.
נמצא את גודלו וקטור השדה המגנטי:

$$Bqv = mg \quad \Rightarrow B = \frac{mg}{qv} = \frac{0.5\cdot10^{-3}\cdot10}{25\cdot10^{-9}\cdot6\cdot10^{4}} = 3.33T$$

19. החלקיק מבצע חצי סיבוב. נחשב חצי מזמן המחזור של הסיבוב:

$$Bqv = \frac{mv^2}{R} \quad \Rightarrow \quad Bq = \frac{mv}{R} = \frac{m\omega R}{R} = m\omega = m\frac{2\pi}{T}$$

$$T = \frac{2\pi\cdot m}{Bq} = \frac{2\pi\cdot6\cdot10^{-8}}{3\cdot7.2\cdot10^{-6}} = 1.745\cdot10^{-2}s$$

$$t = T/2 = 8.73\cdot10^{-3}s$$

20. וקטור עוצמת השדה המגנטי פונה החוצה מהדף. הפרוטון נע בתנועה מעגלית בהשפעת הכוח המגנטי. לכן:

א.
$$Bqv = \frac{mv^2}{R} \quad \Rightarrow \quad B = \frac{mv}{Rq} = \frac{1.67\cdot10^{-27}\cdot10^{7}}{0.06\cdot1.6\cdot10^{-19}} = 1.74T$$

ב. ראה תשובה לשאלה קודמת.

21. נבטא את תדירות הסיבובים של חלקיק טעון הנע בשדה מגנטי אחיד בהשפעת הכוח המגנטי הפועל עליו:

$$Bqv = \frac{mv^2}{R} \quad \Rightarrow \quad Bq = \frac{mv}{R} = \frac{m\omega R}{R} = m\omega = m2\pi f$$

$$f = \frac{Bq}{2\pi m}$$

נסמן ב-f_e וב-f_α את תדירויות האלקטרון וחלקיק ה-α בהתאמה. יחס התדירויות המתקבל מהביטוי האחרון הוא:

$$\frac{f_e}{f_\alpha} = \frac{e/m_e}{2e/m_\alpha} = \frac{m_\alpha}{2m_e} = \frac{6.68\cdot10^{-27}}{2\cdot9.11\cdot10^{-31}} = 3666.3$$

22.

א. נחשב את מהירות יון הליתיום משיקולי אנרגיה:

$$V\cdot e = \frac{mv^2}{2} \quad \Rightarrow \quad v = \sqrt{\frac{2Ve}{m}} = \sqrt{\frac{2\cdot100\cdot1.6\cdot10^{-19}}{1.18\cdot10^{-26}}} = 5.21\cdot10^{4} m/s$$

יון הליתיום נע בתנועה מעגלית בהשפעת הכוח המגנטי. לכן:

$$Bqv = \frac{mv^2}{R} \quad \Rightarrow \quad R = \frac{mv}{Bq} = \frac{1.18\cdot10^{-26}\cdot5.21\cdot10^{4}}{0.5\cdot1.6\cdot10^{-19}} = 7.68\cdot10^{-3}m$$

ב. זמן מחזור הסיבוב של יון הליתיום בשדה המגנטי הוא:

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi\cdot7.68\cdot10^{-3}}{5.21\cdot10^{4}} = 9.26\cdot10^{-7}s$$

23. על פי הקשר שהוצג בפתרון התרגיל הקודם:

$$R = \frac{mv}{Bq}$$

$$E_k = \frac{mv^2}{2} \quad \Rightarrow \quad v = \sqrt{2E_k/m}$$

$$R = \frac{m\sqrt{2E_k/m}}{Bq} = \frac{m}{Bq}\cdot\sqrt{\frac{2E_k\cdot m}{Bq}} = \frac{\sqrt{2\cdot4\cdot10^{-12}\cdot1.67\cdot10^{-27}}}{0.25\cdot1.6\cdot10^{-19}} = 2.89m$$

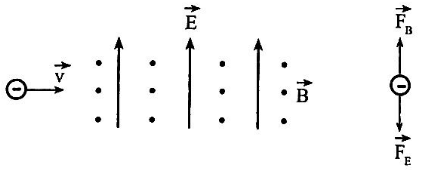
24.

א. נשווה את הכוח החשמלי לכוח המגנטי שפועל על האלקטרון:

$$Eq_e = Bq_e v \quad \Rightarrow \quad v = \frac{E}{B}$$

$$v = \frac{5\cdot10^{4}}{3\cdot10^{-3}} = 1.67\cdot10^{7} m/s$$

ב. אם אלומת האלקטרונים נכנסת משמאל לימין לתוך שדה מגנטי היוצא החוצה מהדף, ולתוך שדה חשמלי המכוון כלפי מעלה, האלומה תחצה את השדות ללא סטייה מכיוונה המקורי.
ראה איור:



ג. אם נסלק את השדה החשמלי, רדיוס הסיבוב של כל אחד מהאלקטרונים באלומה יהיה:

$$R=\frac{mv}{Bq_e}=\frac{9.11\cdot10^{-31}\cdot1.67\cdot10^{7}}{3\cdot10^{-3}\cdot1.6\cdot10^{-19}}=0.03169m\approx3.17cm$$

25. נבטא את הכוח המגנטי הפועל על הפרוטון:

$$F=Bqv\sin\alpha$$

$$\sin\alpha=\frac{F}{Bqv}=\frac{8.2\cdot10^{-13}}{1.7\cdot1.6\cdot10^{-19}\cdot4\cdot10^{6}}=0.7537$$

$$\alpha=48.9^\circ$$

26. האלקטרון נע על פני קשת המהווה 38/360 מהמעגל השלם. זמן מחזורו (ראה פתרון לתרגיל 19):

$$T=\frac{2\pi m}{Bq}=\frac{2\pi\cdot9.11\cdot10^{-31}}{1.5\cdot1.6\cdot10^{-19}}=2.385\cdot10^{-11}s$$

הזמן שהאלקטרון נע לאורך קשת של 38° הוא:

$$t=\frac{38}{360}T=\frac{38}{360}\cdot2.385\cdot10^{-11}=2.52\cdot10^{-12}s$$

תנועה בורגית

27.

א. כאשר כיוון מהירות המטען ניצב לכיוון עוצמת השדה המגנטי, מסלולו של המטען מעגלי.

ב. כאשר כיוון מהירות המטען אינו ניצב לכיוון עוצמת השדה המגנטי, מסלולו של המטען בורגי.

ג. החלקיק מאבד ממהירותו ורדיוס מסלולו קטן. ניתן לראות זאת בביטוי $R=mv/Bq$.

ד. אם בנוסף לשדה המגנטי, קיים גם שדה חשמלי שמקטין את מהירות המטען, פסיעת המסלול קטנה ורדיוס העקמומיות קטן גם הוא.

28.

א. במקרה זה מתקיים:

$$F=Bqv\sin\alpha=\frac{m(v\sin\alpha)^2}{R}$$

$$\Rightarrow R=\frac{mv\sin\alpha}{Bq}=\frac{1.67\cdot10^{-27}\cdot2\cdot10^{7}\cdot\sin30^\circ}{2\cdot1.6\cdot10^{-19}}=0.052m=5.22cm$$

ב. זמן המחזור של הפרוטון הוא:

$$T=\frac{2\pi m}{Bq}=\frac{2\pi\cdot1.67\cdot10^{-27}}{2\cdot1.6\cdot10^{-19}}=3.28\cdot10^{-8}s$$

ג. נחשב את p, גודל פסיעת הבורג של מסלול הפרוטון:

$$p=(v\cos)\cdot T=2\cdot10^{7}\cdot\cos30^\circ\cdot3.28\cdot10^{-8}=0.57m$$

29.

א. נחשב את רדיוס תנועת האלקטרון:

$$R=\frac{mv}{Be}=\frac{9.11\cdot10^{-31}\cdot10^{8}}{4\cdot10^{-7}\cdot1.6\cdot10^{-19}}=1.42\cdot10^{3}m=1.42km$$

ב. רדיוס האלקטרון בקוטב הצפוני הוא:

$$R=\frac{mv}{Be}=\frac{9.11\cdot10^{-31}\cdot10^{8}}{2\cdot10^{-5}\cdot1.6\cdot10^{-19}}=28.47m$$

30.

א. רכיבי הכוח שפעלו על הגוף הטעון הם:

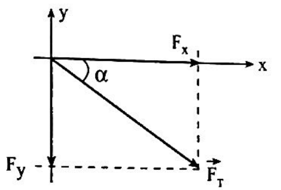
$$F_x=B_zqv_y=0.3\cdot2\cdot10^{-9}\cdot7\cdot10^{4}=4.2\cdot10^{-5}N$$

לפי כלל יד שמאל, היות שכיוונו של וקטור השדה המגנטי בכיוון $(+z)$, כיוונו של וקטור המהירות בכיוון $(+x)$, ומטענו של הגוף הנע הוא חיובי, הכוח המגנטי שפועל עליו הוא לכיוון $(-y)$. גודל רכיב הכוח בכיוון זה הוא:

$$F_y=-B_zqv_x=-0.3\cdot2\cdot10^{-9}\cdot2.5\cdot10^{4}=-1.5\cdot10^{-5}N$$

$$F_z=0$$

ב. נחשב את הכוח השקול הפועל על המטען הנע:



$$F_T = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = \sqrt{(4.2\cdot10^{-5})^2 + (1.5\cdot10^{-5})^2} = 4.46\cdot10^{-5}\,N$$

$$\tan\alpha = \frac{F_y}{F_x} = \frac{1.5\cdot10^{-5}}{4.2\cdot10^{-5}} = 0.3571 \quad\Rightarrow\quad \alpha = 19.65^\circ$$

ג. המסלול בורגי, כי השדה המגנטי גורם לסיבוב במישור xy והמהירות v_z, שאינה מושפעת מהשדה המגנטי, גורמת לפרישת התנועה בכיוון z ויוצרת את פסיעת הבורג.

ד. גודל מהירות הגוף במישור xy אינו מושפע מהשדה המגנטי וערכו:

$$v_{xy} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{\left(2.5\cdot10^4\right)^2 + \left(7\cdot10^4\right)^2} = 7.43\cdot10^4\,m/s$$

נחשב את רדיוס מסלול הגוף:

$$R = \frac{mv_{xy}}{Bq} = \frac{8\cdot10^{-16}\cdot7.43\cdot10^4}{0.3\cdot2\cdot10^{-9}} = 9.9\cdot10^{-2}\,m = 9.9cm$$

ה. נחשב את פסיעת הבורג p של מסלול הגוף הטעון:

$$p = v_z\cdot T = v_z\cdot\frac{2\pi R}{v_{xy}} = 7\cdot10^4\,\frac{2\pi\cdot9.9\cdot10^{-2}}{7.43\cdot10^4} = 0.586m = 58.6cm$$

.31

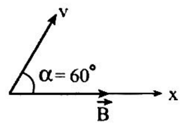
א. נחשב את מהירותם של הפרוטונים. שים לב, יש להמיר קודם את יחידות האנרגיה ליחידות ג'ול (J):

$$E_k = 3keV = 3\cdot10^3\cdot1.6\cdot10^{-19} = 4.8\cdot10^{-16}\,J$$

לפי הקשר הרשום בפתרון תרגיל 23, מתקיים:

$$v = \sqrt{\frac{2E_k}{m}} = \sqrt{\frac{2\cdot4.8\cdot10^{-16}}{1.67\cdot10^{-27}}} = 7.58\cdot10^5\,m/s$$

רכיב המהירות המכוון בכיוון עוצמת השדה המגנטי נשאר קבוע וגודלו:



$$v_x = v\cos60^\circ = 3.79\cdot10^5\,m/s$$

ב. מהירות זו מייצגת את התקדמות הפרוטון (את "סחיפתו") בכיוון וקטור עוצמת השדה המגנטי $(+x)$.

ג. כפי שהודגם בתרגילים קודמים, רדיוס המסלול הבורגי ניתן על ידי הביטוי הבא:

$$R = \frac{mv_y}{Bq} = \frac{1.67\cdot10^{-27}\cdot7.58\cdot10^5\cdot\sin60^\circ}{0.4\cdot1.6\cdot10^{-19}} = 0.017m = 1.7cm$$

ד. זמן המחזור של התנועה הבורגית הוא:

$$T = \frac{2\pi R}{v_y} = \frac{2\pi\cdot0.017}{7.58\cdot10^5\cdot\sin60^\circ} = 1.63\cdot10^{-7}\,s$$

ה. נחשב את גודל פסיעת הבורג p:

$$p = v_xT = 3.79\cdot10^5\cdot1.63\cdot10^{-7} = 0.062m = 6.2cm$$

ספקטרוגרף מסות וציקלוטרון

.32

א. בבורר המהירויות עוברים אך ורק חלקיקים המקיימים:

$$Bqv = Eq$$

$$v = \frac{E}{B} = \frac{4.8\cdot10^5}{0.3} = 1.6\cdot10^6\,m/s$$

ב. האנרגיה הקינטית של הפרוטונים העוברים בבורר המהירויות היא:

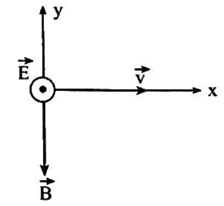
$$E_{kp} = \frac{m_pv^2}{2} = \frac{1.67\cdot10^{-27}\cdot(1.6\cdot10^6)^2}{2} \approx 2.14\cdot10^{-15}\,J = 1.34\cdot10^4\,eV$$

ג. האנרגיה הקינטית של אלקטרונים החולפים בבורר המהירויות היא:

$$E_{ke}=\frac{m_e v^2}{2}=\frac{9.11\cdot10^{-31}\cdot(1.6\cdot10^{6})^2}{2}\approx1.17\cdot10^{-18}J=7.29eV$$

.33

א. על כל פרוטון פועל כוח מגנטי שכיוונו אל תוך הדף. לכן, הכוח החשמלי צריך לפעול החוצה מהדף. מאחר שמדובר במטען חיובי, ניתן להסיק את המסקנה שגם וקטור השדה החשמלי פונה החוצה מהדף. באיור, הווקטור $\vec{E}$ מסומן באמצעות נקודה.



ב. נחשב את גודל עוצמת השדה החשמלי:

$$Bqv=Eq$$

$$E=Bv=0.85\cdot1.24\cdot10^{4}=1.05\cdot10^{4}V/m$$

כאמור בסעיף א', כיוונה של עוצמת השדה החשמלי היא החוצה ממישור הדף.

ג. האלקטרונים לא יסטו מכיוונם המקורי. הכוח החשמלי והכוח המגנטי הפועלים על האלקטרונים מנוגדים לכוחות שפעלו על הפרוטונים, אבל משוואת הכוחות אינה תלויה במסתם של המטענים.

.34

א. תחילה, נחשב את מהירות יון המגנזיום מתוך ידיעת מתח ההאצה. בהמשך נציב את ערך המהירות בביטוי לחישוב רדיוס המסלול:

$$Vq=\frac{mv^2}{2}\quad\Rightarrow\quad v=\sqrt{\frac{2Vq}{m}}=\sqrt{\frac{2\cdot2.5\cdot10^{3}\cdot1.6\cdot10^{-19}}{3.983\cdot10^{-26}}}=1.42\cdot10^{5}m/s$$

$$R=\frac{mv}{Bq}=\frac{3.983\cdot10^{-26}\cdot1.42\cdot10^{5}}{55.7\cdot10^{-3}\cdot1.6\cdot10^{-19}}=0.635m=63.5cm$$

ב. נסמן את מסות יוני המגנזיום $^{24}Mg^{+1}$ ו-$^{26}Mg^{+1}$ בסימון m_{24} ו- m_{26} בהתאמה.

$$R=\frac{m}{Bq}\cdot\sqrt{\frac{2Vq}{m}}=\frac{1}{B}\sqrt{\frac{m^2}{q^2}\cdot\frac{2Vq}{m}}=\frac{1}{B}\sqrt{\frac{2Vm}{q}}$$

$$\frac{R_{26}}{R_{24}}=\sqrt{\frac{m_{26}}{m_{24}}}=\sqrt{\frac{26}{24}}$$

$$R_{26}=R_{24}\cdot\sqrt{\frac{26}{24}}=63.5\cdot\sqrt{\frac{26}{24}}\approx66.1cm$$

.35

א. נסמן את רדיוס המסלול של כל אחד מהיונים ב- R_{12} וב-R_{13} בהתאמה. המשוואה המבטאת את רדיוסו של חלקיק טעון בשדה מגנטי אחיד היא:

$$R=\frac{mv}{Bq}$$

מביטוי זה ניתן לראות ש- $R_{13} > R_{12}$ כי הגדלים v, q, B זהים לשני היונים. לאחר שהשלימו חצי סיבוב, המרחק Δx בין היונים הוא ההפרש בין הקטרים של המסלולים המעגליים:

$$\Delta x=2R_{13}-2R_{12}=\frac{2v}{Bq}(m_{13}-m_{12})$$

$$\Rightarrow\quad\Delta x=\frac{2\cdot6.67\cdot10^{5}}{0.85\cdot1.6\cdot10^{-19}}(21.59-19.93)\cdot10^{-27}=0.0163m=1.63cm$$

ב. בבורר המהירויות עוברים אך ורק יונים שמהירותם ניתנת על ידי הביטוי הבא:

$$Bqv=Eq$$

$$\Rightarrow\quad E=Bv=0.85\cdot6.67\cdot10^{5}=5.67\cdot10^{5}V/m$$

.36 נחשב את מהירותו של החלקיק הנתון:

$$Bqv=Eq$$

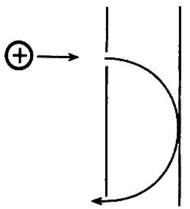
$$v=\frac{E}{B}=\frac{3.8\cdot10^{3}}{0.36}=1.055\cdot10^{4}m/s$$

בשדה המגנטי, החלקיק נע בהשפעת הכוח המגנטי בתנועה מעגלית. לכן:

$$Bqv=\frac{mv^2}{R}$$

$$\Rightarrow\quad\frac{q}{m}=\frac{v}{RB}=\frac{1.055\cdot10^{4}}{0.043\cdot0.36}=6.82\cdot10^{5}C/kg$$

37. הפרוטון נע בין הלוחות בתנועה מעגלית ברדיוס שערכו צריך להיות $25cm$. לכן:



$$Bq_p v = \frac{m_p v^2}{R}$$

$$B = \frac{m_p v}{R q_p} = \frac{1.67\cdot10^{-27}\cdot3.5\cdot10^6}{0.25\cdot1.6\cdot10^{-19}} = 0.146T$$

38.

א. נחשב את האנרגיה הקינטית של פרוטונים אלה ביחידות ג'ול ואת מהירותם:

$$E_k = 25MeV = 25\cdot10^6\cdot1.6\cdot10^{-19} = 4\cdot10^{-12}J$$

$$E_k = \frac{m_p v^2}{2} \quad \Rightarrow \quad v = \sqrt{\frac{2E_k}{m_p}} = \sqrt{\frac{2\cdot4\cdot10^{-12}}{1.67\cdot10^{-27}}} = 6.92\cdot10^7 m/s$$

ב. הרדיוס המזערי של המכשיר הוא למעשה, כרדיוס המרבי - R_{max} של מסלול הפרוטון שהואץ לאנרגיה הנדרשת. לכן:

$$R_{\max} = \frac{m_p\cdot v_{\max}}{Bq_p} = \frac{1.67\cdot10^{-27}\cdot6.92\cdot10^7}{1.8\cdot1.6\cdot10^{-19}} = 0.40m = 40cm$$

כלומר, הרדיוס המזערי של המכשיר העונה על דרישות השאלה, הוא $40cm$.

ג. תדירות הסיבוב של הפרוטונים בציקלוטרון קבועה. לכן, די לחשב את תדירותם בסיבוב האחרון:

$$v = \omega R = 2\pi fR \quad \Rightarrow \quad f = \frac{v}{2\pi R}$$

$$f = \frac{6.92\cdot10^7}{2\pi\cdot0.4} = 2.75\cdot10^7 Hz = 27.5MHz$$

ד. בכל סיבוב גדֵלה האנרגיה הקינטית של הפרוטון בשיעור $2Vq$, כאשר V הוא המתח בין חלקי הציקלוטרון. הפרוטון מואץ ב-n סיבובים. לכן:

$$\Delta E_k = n(2Vq_p)$$

$$n = \frac{\Delta E_k}{2Vq_p} = \frac{4\cdot10^{-12}}{2\cdot50\cdot10^3\cdot1.6\cdot10^{-19}} = 250$$

39.

א. תדירות תנועת הפרוטונים f בציקלוטרון קבועה וניתנת על ידי הביטוי הבא:

$$\frac{mv^2}{R} = Bqv$$

$$\omega = \frac{v}{R} = 2\pi\cdot f = \frac{Bq}{m}$$

$$\Rightarrow \quad f = \frac{Bq}{2\pi\cdot m} = \frac{1.4\cdot1.6\cdot10^{-19}}{2\pi\cdot1.67\cdot10^{-27}} = 2.135\cdot10^7 Hz = 21.35MHz$$

ב. נחשב את מהירות הפרוטונים על פי הביטויים מסעיף א' ונציב בביטוי המגדיר את האנרגיה הקינטית E_k:

$$v = \frac{BqR}{m} = \frac{1.4\cdot1.6\cdot10^{-19}\cdot0.7}{1.67\cdot10^{-27}} = 9.39\cdot10^7 m/s$$

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{1.67\cdot10^{-27}\cdot(9.39\cdot10^7)^2}{2} = 7.36\cdot10^{-12}J$$

$$7.36\cdot10^{-12}J = \frac{7.36\cdot10^{-12}}{1.6\cdot10^{-19}} = 4.6\cdot10^7 eV = 46Mev$$

ג. מסת יוני הדויטריום גדולה פי 2 ממסת המימן הרגיל. מצד שני, מטעני היונים המוזכרים בשאלה שווים. כפי שניתן לראות מהביטויים שהוצגו בסעיפים הקודמים, התדירות במקרה זה קטנה פי 2.

בתום ההאצה באותו ציקלוטרון, המהירות v, גם היא קטנה פי 2. נסמן את האנרגיה הקינטית של יוני הדויטריום ב-E_k^{*} ונבטא אותה:

$$E_k^{*} = \frac{(2m)\cdot(v/2)^2}{2} = \frac{mv^2}{4} = \frac{E_k}{2}$$

מסקנה: האנרגיה של יוני הדויטריום היא מחצית מהאנרגיה של הפרוטונים.

.40

א. בכל סיבוב, האנרגיה הקינטית המוענקת לחלקיק ה-α היא:

$$\Delta E_k = 2Vq = 2\cdot 16\cdot 10^3\left(2\cdot 1.6\cdot 10^{-19}\right) = 1.024\cdot 10^{-14}J$$

אחרי 10 סיבובים, האנרגיה של החלקיק היא: $1.024\cdot 10^{-13}J$.

ב. תדירות הסיבוב f יכולה להיחשב זהה לכל המסלולים המעגליים (ראה הסבר בספר הלימוד, פרק 7, סעיף 7-ג'). ערכה של התדירות הוא: $f = Bq/2\pi m$. כל הגדלים באגף ימין קבועים, לכן, התדירות אינה תלויה ברדיוס הסיבוב או במהירותם של החלקיקים המואצים.

.41

א. נתעלם מהזמן שבו החלקיקים שוהים במרווח בין ה-"D"-ים. על פי הביטוי לתדירות הסיבוב, (ראה פתרון לתרגיל 39) זמן מחזור הסיבוב הוא:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi m}{Bq} = \frac{2\pi\cdot 6.68\cdot 10^{-27}}{1.67\cdot(2\cdot 1.6\cdot 10^{-19})} = 7.85\cdot 10^{-8}s$$

200 סיבובים יתבצעו תוך $200T = 1.57\cdot 10^{-5}s$.

ב. נחשב את האנרגיה הקינטית של חלקיקי ה-α כשהם עוזבים את הציקלוטרון (ראה גם תשובה לשאלה 40, סעיף א'):

$$E_k = 200(2V\cdot q_\alpha) = 200\cdot 2\cdot 100\cdot 10^3\cdot(2\cdot 1.6\cdot 10^{-19}) = 1.28\cdot 10^{-11}J$$

$$\Rightarrow v = \sqrt{\frac{2E_k}{m_\alpha}} = \sqrt{\frac{2\cdot 1.28\cdot 10^{-11}}{6.68\cdot 10^{-27}}} = 6.19\cdot 10^7 m/s$$

$$R = \frac{v}{\omega} = \frac{vT}{2\pi} = \frac{6.19\cdot 10^7\cdot 7.85\cdot 10^{-8}}{2\pi} = 0.773m = 77.3cm$$

ג. נחשב את מהירות החלקיקים אחרי 100 סיבובים ואת רדיוס הסיבוב ה-100. האנרגיה הקינטית אחרי 100 סיבובים היא:

$$E_{k100} = \frac{E_{k200}}{2} = \frac{1.28\cdot 10^{-11}}{2} = 0.64\cdot 10^{-11}J$$

לכן:

$$v_{100} = \sqrt{\frac{2E_{k100}}{m}} = \sqrt{\frac{E_{k200}}{m}} = \sqrt{\frac{1.28\cdot 10^{-11}}{6.68\cdot 10^{-27}}} = 4.38\cdot 10^7 m/s$$

$$R_{100} = \frac{v_{100}\cdot T}{2\pi} = \frac{4.38\cdot 10^7\cdot 7.85\cdot 10^{-8}}{2\pi} = 0.547m$$

$$\Delta R = R_{200} - R_{100} = 77.3 - 54.7 = 22.6cm$$

כוח מגנטי על זרם

התרגילים הבאים עוסקים במצבים שונים בהם פועל כוח מגנטי F על תייל שאורכו l, ואשר נושא זרם בעוצמה I.

.42

א. כאשר התייל מקביל לקווי השדה המגנטי, הכוח מתאפס: $F = BIl\sin 0° = 0$.

ב. כאשר התייל מאונך לקווי השדה המגנטי: $F = BIl = 0.3\cdot 2.5\cdot 0.4 = 0.3N$.

ג. $F = BIl\sin 60° = 0.3\cdot 2.5\cdot 0.4\cdot\sin 60° = 0.26N$

.43 כאשר התייל מאונך לקווי השדה המגנטי, מתקיים:

$$F = BIl = 5\cdot 10^{-5}\cdot 350\cdot 140 = 2.45N$$

.44 אורך התייל הוא:

$$l = \frac{F}{BI\sin\alpha} = \frac{7.5\cdot 10^{-5}}{5\cdot 10^{-5}\cdot 0.8\cdot\sin 60°} = 2.165m$$

.45 הכוח המגנטי הפועל על כל אחת מצלעות התייל במשולש הוא:

$F_{LM} = 0$, כי הווקטור המתאר את כיוון עוצמת השדה המגנטי מקביל לכיוון התייל.

$$F_{KL} = BIl_{KL} = 0.2\cdot 5\cdot 3\tan 60° = 5.196N$$

$$F_{KM} = BIl_{KM}$$

$$\frac{3}{l_{KM}} = \cos 60° \qquad l_{KM} = \frac{3}{\cos 60°}$$

$$F_{KM} = BIl_{KM}\cdot\sin 120° = 0.2\cdot 5\cdot\frac{3}{\cos 60°}\cdot\sin 120° = 5.196N$$

<u>הערה</u>: הכוח על הצלע KM שווה לכוח הפועל על הצלע KL כי:

$$l_{KM}\cdot\sin 120° = l_{KM}\cdot\sin 60° = l_{KL}$$

כיוונם של הכוחות לתוך הדף.

46.

א. עוצמות הזרמים בתיילים הן: I_1 ו- $(-I_2)$, אורך כל תייל הוא l ועוצמת השדה המגנטי היא B.
הכוח השקול הפועל על שני התיילים הצמודים הוא:

$$\sum F = Bl(I_2 - I_1)$$

$$\Rightarrow I_2 - I_1 = \frac{\sum F}{Bl} = \frac{4.8}{0.32\cdot 3} = 5A$$

$$I_2 = I_1 + 5A = 10A$$

ב. אפשר להניח שהמערכת מתנהגת כאילו קיים תייל יחיד שעוצמת הזרם בו היא הפרש שני הזרמים, כלומר $5A$.

$$\sum F' = B(I_2 - I_1)\cdot l\sin\alpha$$

$$\sin\alpha = \frac{\sum F'}{B(I_2 - I_1)\cdot l} = \frac{0.2\sum F}{B(I_2 - I_1)\cdot l} = 0.2$$

$$\Rightarrow \alpha = 11.54^\circ$$

47.

א. על פי כלל יד שמאל, כיוון הזרם במוט הוא מימין לשמאל.

ב. נסמן ב-k את קבוע הקפיצים וב-Δx את התארכותם. נחשב את קבוע הקפיצים:

$$F = BIl = 2k\Delta x$$

$$k = \frac{BIl}{2\Delta x} = \frac{3.2\cdot 0.8\cdot 1.2}{2\cdot 0.03} = 51.2N/m$$

ג. במקרה זה, עוצמת הזרם במוט היא:

$$I = \frac{2k\Delta x}{Bl} = \frac{2\cdot 51.2\cdot 0.012}{3.2\cdot 1.2} = 0.32A$$

כמובן שהזרם במוט צריך לזרום משמאל לימין.

48. אורכי האלכסונים של הפאות (המתוארים בשאלה) הם:

$$l_{fg} = l_{cd} = 0.06\sqrt{2}\,m$$

הכוחות הפועלים על קטעי התייל השונים הם:

- על הקטע ab: $F_{ab} = BIl_{ab} = 1.6\cdot 5\cdot 0.06 = 0.48N$ בכיוון (+z).
- על הקטע bd: $F_{bd} = BIl\sin 180^\circ = 0$.
- על הקטע dc: $F_{dc} = BIl_{dc}\sin 45^\circ = 1.6\cdot 5\cdot 0.06\sqrt{2}\cdot\sin 45^\circ = 0.48N$ בכיוון (-x).
- על הקטע cg: $F_{cg} = BIl\sin 180^\circ = 0$.
- על הקטע gf: $F_{gf} = BIl_{gf}\sin 45^\circ = 1.6\cdot 5\cdot 0.06\sqrt{2}\cdot\sin 45^\circ = 0.48N$ בכיוון (–z).
- על הקטע fa: $F_{fa} = BIl_{fa} = 1.6\cdot 5\cdot 0.06 = 0.48N$ בכיוון (+x).

<u>הערה</u>: בדומה למה שראינו בתשובה לשאלה 45, אם התייל אינו מאונך לכיוון השדה המגנטי, גודל הכוח הפועל עליו שווה לגודל הכוח הפועל על ההֶטֵל שלו בכיוון מאונך לשדה. לכן, למשל $F_{gf} = F_{dc} = F_{cg}$.

49.

א. הכריכה באיור א' נוטה להסתובב סביב ציר כך שהצלע FG נכנסת למישור הדף. במצב המתואר באיור א', הכוחות הפועלים על הצלעות EF ו-GH אינם תורמים לסיבוב הכריכה כי הם פועלים במישור הכריכה ומבטלים זה את זה. על הצלעות EH ו-FG פועלים (באיור א') כוחות ניצבים למישור הכריכה, ובכך גורמים לסיבובה של הכריכה. באיור ב', הכוחות על צלעות אלה פועלים במישור הכריכה ולכן הם מבטלים זה את זה.

ב. מומנט הסיבוב τ ניתן על ידי הביטוי:

$$\tau = BIS = BI(a\cdot b)$$

ג. הגורמים שמשפיעים על מומנט הסיבוב הם:

- גודל עוצמת השדה המגנטי;
- עוצמת הזרם בכריכה;
- שטח הכריכה;
- כיוון מישור הכריכה ביחס לכיוון וקטור עוצמת השדה המגנטי.

ד. על פי כלל יד שמאל, ניתן לראות שכל אחת מצלעות הכריכה באיור ב' נמשכת בהשפעת הכוחות המגנטיים כלפי מרכז הכריכה; מכאן שהכריכה "נוטה להתכווץ".

.50

א. על פי כיוון הטייתם של החלקיקים בשדה המגנטי, ניתן להסיק שמטען החלקיקים חיובי.

ב. כדי שהחלקיקים ינועו בקו ישר, צריך להתקיים התנאי:

$$F_E = F_B$$

$$Eq = Bqv$$

$$v = \frac{E}{B}$$

ג. המרחק KO הוא פעמיים רדיוס הסיבוב של החלקיקים, לכן:

$$Bqv = \frac{mv^2}{R} \qquad \Rightarrow R = \frac{mv}{Bq}$$

$$\Rightarrow \quad KO = 2R = \frac{2mv}{Bq} = \frac{2mE/B}{Bq} = \frac{2mE}{B^2q}$$

ד. היחס E/B חייב להישאר קבוע, אחרת החלקיקים לא יעברו דרך בורר המהירויות. מהביטוי האחרון ניתן להסיק, שהקטנת הגדלים E ו-B באופן שהיחס ביניהם לא ישתנה, תגרום להגדלת המרחק KO, כי ערך הביטוי $\frac{2mE}{Bq}$ לא ישתנה וערך הביטוי $\frac{1}{B}$ יגדל.

.51

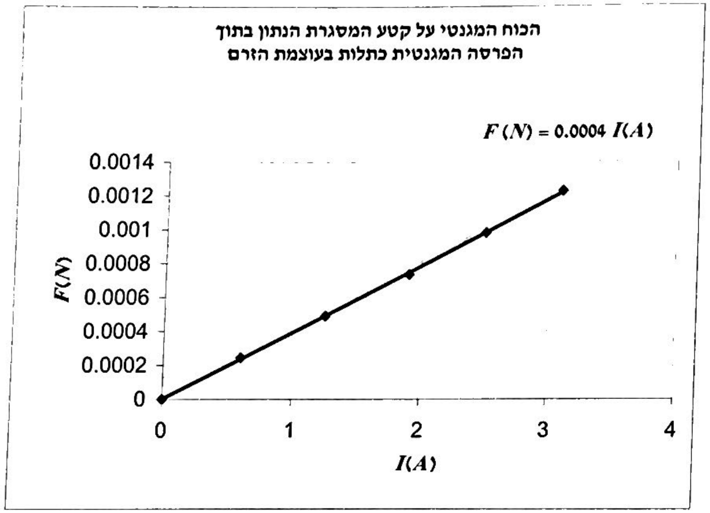
א. במבט אל האיור, כיוון עוצמת השדה המגנטי בפרסה הוא מימין לשמאל.

ב. כאשר המסגרת מאוזנת, הכוח המגנטי הפועל על הצלע FE שווה לכוח הכובד הפועל על הצלע GD:

$$F = n\cdot mg = n\cdot 25\cdot 10^{-6}\cdot 10 = n\cdot 2.5\cdot 10^{-4}\,N$$

בהתאם לכך, ניתן לרשום טבלת ערכים המציינים את ערכי הכוח המגנטי בהתאם לעוצמות הזרמים השונות:

$F(\text{x}10^{-4}N)$	$I(A)$
2.5	0.60
5.0	1.25
7.5	1.90
10.0	2.50
12.5	3.10
15.0	3.80



ג. ערך שיפוע הגרף m הוא $m = 4\cdot 10^{-4}\ (N/A)$.

ד. נחשב את גודל עוצמת השדה המגנטי של הפרסה. הכוח המגנטי הפועל על קטע באורך l של התייל הוא $F = BIl$ ולכן, שיפוע הגרף $m = \frac{F}{I}$ מייצג את המכפלה $B\cdot l$. מכאן שגודל עוצמת השדה המגנטי של הפרסה הוא:

$$B = \frac{m}{l} = \frac{4\cdot 10^{-4}}{0.03} = 1.33\cdot 10^{-2}\,T$$

<u>הערה</u>: עוצמת השדה המגנטי של הפרסה גדולה בשלושה סדרי גודל מעוצמת השדה המגנטי של כדור הארץ. לכן, בניסוי המתואר, מוצדקת ההתעלמות מהשפעת השדה המגנטי הארצי.

פרק 8 - מקורות השדה המגנטי

.1

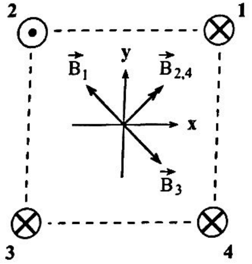
א. על פי כלל יד ימין כיוון הזרם באיור a הוא לתוך הדף. באיור b כיוון הזרם הוא החוצה מהדף.

ב. כיוון הזרם החשמלי נחשב בכיוון תנועתם של נושאי מטען חיובי, כלומר בניגוד לכיוון תנועתם של האלקטרונים. לכן, אלומת אלקטרונים יוצרת את המצב המתואר באיור a אם היא מכוונת החוצה מהדף. באיור b כיוון האלומה הוא לתוך הדף.

2. על פי כלל יד ימין הזרם באיור א' מכוון שמאלה ובאיור ב' כיוונו כלפי מעלה.

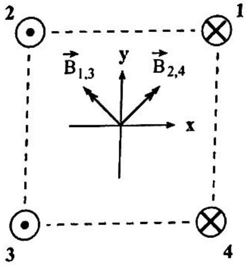
3. נסמן את התיילים במספרים 1-4 כמתואר באיור. החיצים המסומנים במרכז הריבוע, מציינים את וקטורי עוצמת השדה המגנטי שיוצר כל אחד מהזרמים בהתאמה.

איור א':



וקטור עוצמת השדה המגנטי השקול מכוון בזווית של 45° ביחס לכל אחד מהצירים +x ו-+y.

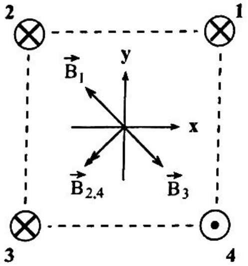
איור ב':



וקטור עוצמת השדה המגנטי השקול מכוון בכיוון +y.

.4

א. מחט המצפן מתייצבת בכיוון עוצמת השדה המגנטי השקול. במקרה זה, כיוונה 45° יחסית לציר (-x) ברביע השלישי. ביטוי אחר לתוצאה זו: בכיוון (-135°) יחסית לציר +x.



ב. על פי כלל יד ימין, בקודקוד מספר 4, כיוון עוצמת השדה המגנטי הנוצר על ידי <u>כל אחד</u> מהתיילים 1,2,3 הוא:

1) -x.

2) -135° ביחס לציר x.

3) -y.

ג. תייל מספר 4 מושפע מהשדה המגנטי השקול לשדות שחישבנו בסעיף ב'. כיוון עוצמת השדה המגנטי השקול בקודקוד 4 הוא (-135°) יחסית לכיוון +x.

<u>על פי כלל יד שמאל</u>, כיוון הכוח המגנטי הפועל על התייל הוא 45° מתחת לציר +x.

5. עוצמת השדה המגנטי סביב תייל ארוך מחושבת על פי הביטוי הבא:

$$B = \mu_0 \frac{I}{2\pi r} \quad \Rightarrow$$

$$r = \frac{\mu_0 I}{2\pi B} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 60}{2\pi \cdot 3 \cdot 10^{-4}} = 0.04m = 4cm$$

6. נחשב את עוצמת הזרם של הברק:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{16}{1.2 \cdot 10^{-3}} = 1.33 \cdot 10^4 A$$

נציב ערך זה בביטוי לחישוב עוצמת השדה המגנטי סביב זרם חשמלי ישר וארוך:

$$B=\mu_0\frac{I}{2\pi r}=\frac{4\pi\cdot10^{-7}\cdot1.33\cdot10^{-4}}{2\pi\cdot15}=1.78\cdot10^{-4}T$$

.7

א. כיוון עוצמת השדה המגנטי באזור הנמצא מתחת לתייל הוא החוצה מהדף. כאשר האלקטרון נע ימינה, הכוח המגנטי הפועל עליו מכוון כלפי מעלה (על פי כלל יד שמאל) וגודלו:

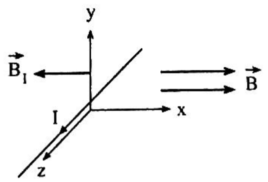
$$F=Bqv=\frac{\mu_0 I}{2\pi r}ev=\frac{4\pi\cdot10^{-7}\cdot25}{2\pi\cdot0.03}1.6\cdot10^{-19}\cdot5\cdot10^{6}=1.33\cdot10^{-16}N$$

ב. הכוח הפועל על האלקטרון הוא אפס, כי הזווית בין מהירות האלקטרון לבין כיוון וקטור עוצמת השדה המגנטי היא 180°.

ג. על פי החישוב שהוצג בפתרון לסעיף א', הכוח הפועל על האלקטרון הוא: $1.33\cdot10^{-16}N$ וכיוונו שמאלה.

.8 בכל אחד מהמקרים נחשב את עוצמת השדה המגנטי B_I שנוצר על ידי זרם התייל. את התוצאה נחבר חיבור וקטורי עם עוצמת השדה $B_x=10^{-6}T$ שהתייל נמצא בו.

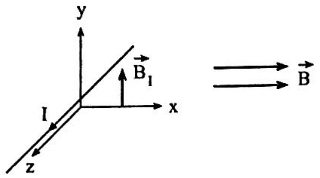
א. עוצמת השדה הנוצר על ידי התייל B_I מכוונת בכיוון (-x)



וגודל עוצמתה הוא:

$$B_I=\mu_0\frac{I}{2\pi r}=\frac{4\pi\cdot10^{-7}\cdot10}{2\pi\cdot2}=10^{-6}T$$
$$\Rightarrow \vec{B}_I+\vec{B}_x=0$$

ב. על פי החישוב שהצגנו בסעיף א' $B_I=10^{-6}T$ וכיוונו במקרה זה הוא (+y).

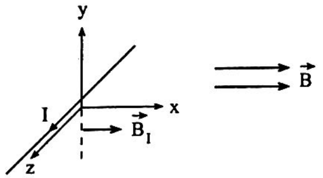


עוצמת השדה השקול היא:

$$B_T=\sqrt{B_x^2+B_I^2}=\sqrt{\left(10^{-6}\right)^2+\left(10^{-6}\right)^2}=10^{-6}\cdot\sqrt{2}=1.41\cdot10^{-6}T$$

כיוון עוצמת השדה המגנטי השקול הוא 45° מעל ציר (+x), במישור (x,y).

ג. במקרה זה, הווקטור B_I מכוון - על פי כלל ימין - לכיוון (+x), לכן גם כיוונה של עוצמת השדה המגנטי השקול הוא בכיוון (+x).



נחשב את ערכו של B_I:

$$B_I=\mu_0\frac{I}{2\pi r}=\frac{4\pi\cdot10^{-7}\cdot10}{2\pi\cdot0.5}=4\cdot10^{-6}T$$
$$\Rightarrow B_T=B_I+B_x=4\cdot10^{-6}+10^{-6}=5\cdot10^{-6}T$$

9. נסמן ב- $\vec{B}_1$ וב- $\vec{B}_2$ את עוצמות השדות המגנטיים הנוצרים על ידי הזרמים I_1 ו-I_2 בהתאמה.

נחשב את B_1 ואת B_2 עבור המרחק $r = 0.2m$:

$$B_1 = \mu_0 \frac{I_1}{2\pi r} = \frac{4\pi\cdot10^{-7}\cdot5}{2\pi\cdot0.2} = 5\cdot10^{-6}T$$

$$B_2 = \mu_0 \frac{I_2}{2\pi r} = \frac{4\pi\cdot10^{-7}\cdot3}{2\pi\cdot0.2} = 3\cdot10^{-6}T$$

א. בנקודה a:

על פי כלל יד ימין, כיוון $\vec{B}_1$ החוצה מהדף וכיוון $\vec{B}_2$ לתוך הדף. לכן:

$$B_T = (5-3)\cdot10^{-6} = 2\cdot10^{-6}T$$

וקטור עוצמת השדה השקול פונה החוצה מהדף (לכיוון $\vec{B}_1$).

ב. בנקודה b:

על פי כלל יד ימין, שני הווקטורים $\vec{B}_1$ ו-$\vec{B}_2$ מכוונים החוצה מהדף. לכן, זהו גם כיוונו של הווקטור השקול. גודלו של וקטור עוצמת השדה המגנטי השקול הוא:

$$B_T = B_1 + B_2 = (5+3)\cdot10^{-6} = 8\cdot10^{-6}T$$

ג. בנקודה c:

על פי כלל יד ימין, $\vec{B}_1$ מופנה לתוך הדף ו-$\vec{B}_2$ כיוונו החוצה מהדף. לכן:

$$B_T = B_1 - B_2 = (5-3)\cdot10^{-6} = 2\cdot10^{-6}T$$

כיוונו של הווקטור השקול לתוך הדף.

ד. בנקודה d:

על פי כלל יד ימין, שני הווקטורים $\vec{B}_1$ ו-$\vec{B}_2$ מכוונים לתוך הדף. לכן:

$$B_T = B_1 + B_2 = (5+3)\cdot10^{-6} = 8\cdot10^{-6}T$$

כיוונו של הווקטור השקול לתוך הדף.

10. כיוון וקטור השדה המגנטי סביב זרמים נקבע על פי כלל יד ימין.

נסמן ב- $\vec{B}_1$ וב- $\vec{B}_2$ את עוצמות השדות המגנטיים הנוצרים על ידי הזרמים I_1 ו-I_2 בהתאמה.

נחשב את הגדלים של וקטורים אלה, את B_1 ואת B_2, עבור המרחקים המתאימים. בחישוב גודל הווקטור השקול נחשב גם את כיווניהם של $\vec{B}_1$ ו-$\vec{B}_2$.

א. בנקודה A: וקטורי השדות $\vec{B}_1$ ו- $\vec{B}_2$ מופנים החוצה מהדף. לכן:

$$B_A = B_1 + B_2 = \frac{\mu_0}{2\pi}\left(\frac{I_1}{r_1}+\frac{I_2}{r_2}\right) = \frac{4\pi\cdot10^{-7}}{2\pi}\left(\frac{20}{0.09}+\frac{30}{0.03}\right) = 2.44\cdot10^{-4}T$$

כיוונו של הווקטור $\vec{B}_A$ הוא **החוצה מהדף**.

ב. בנקודה B: הווקטור $\vec{B}_1$ פונה החוצה מהדף ו-$\vec{B}_2$ מכוון לתוך הדף.

$$B_B = B_1 - B_2 = \frac{\mu_0}{2\pi}\left(\frac{I_2}{r_2}-\frac{I_1}{r_1}\right) = \frac{4\pi\cdot10^{-7}}{2\pi}\left(\frac{30}{0.03}-\frac{20}{0.03}\right) = 6.67\cdot10^{-5}T$$

הווקטור $\vec{B}_B$ מכוון **לתוך הדף** (לכיוון הווקטור $\vec{B}_2$).

ג. בנקודה C: שני הווקטורים $\vec{B}_1$ ו- $\vec{B}_2$ פונים לתוך הדף. לכן, הווקטור השקול יפנה גם הוא **לתוך הדף**. גודלו של הווקטור השקול $\vec{B}_C$ הוא:

$$B_C = B_1 + B_2 = \frac{\mu_0}{2\pi}\left(\frac{I_1}{r_1}+\frac{I_2}{r_2}\right) = 2\cdot10^{-7}\cdot\left(\frac{20}{0.03}+\frac{30}{0.09}\right) = 2\cdot10^{-4}T$$

11. נסמן ב- $I_1 = 4A$ ו- $I_2 = 10A$. על פי הכלל שבפתרון התרגילים 9-10, נסמן ב- $\vec{B}_1$ וב- $\vec{B}_2$ את עוצמות השדות המגנטיים הנוצרים על ידי הזרמים I_1 ו-I_2 בהתאמה.

א.

$$B_A = B_2 - B_1 = \frac{\mu_0}{2\pi}\left(\frac{I_2}{0.03}-\frac{I_1}{0.03}\right) = \frac{2\cdot10^{-7}}{0.03}(10-4) = 4\cdot10^{-5}T$$

הווקטור $\vec{B}_A$ מכוון לתוך הדף, בכיוון $\vec{B}_2$.

ב.

$$B_B = B_1 + B_2 = \frac{\mu_0}{2\pi}\left(\frac{I_1}{0.03}+\frac{I_2}{0.03}\right) = \frac{2\cdot10^{-7}}{0.03}(4+10) = 9.33\cdot10^{-5}T$$

הווקטור $\vec{B}_B$ מכוון החוצה מהדף.

ג.

$$B_C = B_2 - B_1 = \frac{\mu_0}{2\pi}\left(\frac{I_2}{0.06}-\frac{I_1}{0.06}\right) = \frac{2\cdot10^{-7}}{0.06}(10-4) = 2\cdot10^{-5}T$$

כיוונו של הווקטור $\vec{B}_C$ הוא לתוך הדף.

ד.

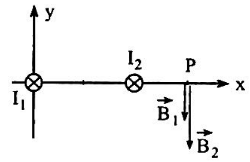
$$B_D = B_1 - B_2 = \frac{\mu_0}{2\pi}\left(\frac{I_1}{0.03}-\frac{I_2}{0.03}\right) = 2\cdot10^{-7}\cdot\left(\frac{4}{0.03}-\frac{10}{0.06}\right) = -6.67\cdot10^{-6}T$$

מאחר שקיבלנו תוצאה שלילית, אנו מבינים שכיוונו של הווקטור $\vec{B}_D$ מנוגד לכיוונו של $\vec{B}_1$, כלומר הוא מכוון החוצה מהדף.

12.

א. משיקולי סימטריה $\vec{B}=0$ (התילים יוצרים שדות מגנטיים שווי גודל ומנוגדי כיוון).

ב. שיעורי הנקודה P הם $(6cm,0)$. בנקודה זו כל אחד מהתיילים יוצר שדה מגנטי שכיוונו (-y).



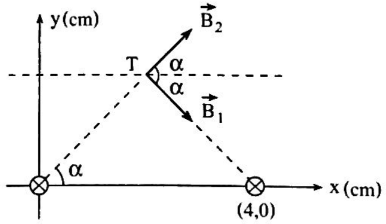
גודל עוצמת השדה בנקודה P הוא:

$$B_P = B_1 + B_2 = \frac{\mu_0\cdot I}{2\pi}\left(\frac{1}{0.06}+\frac{1}{0.02}\right) = 2\cdot10^{-7}\cdot5\cdot\left(\frac{1}{0.06}+\frac{1}{0.02}\right) = 6.67\cdot10^{-5}T$$

כיוונו של הווקטור $\vec{B}_P$ הוא (-y).

ג. שיעורי הנקודה T הם (2cm , 2cm).

במקום זה התיילים יוצרים שדות מגנטיים שעוצמתם בעלת גודל שווה, $B_1 = B_2$.



הזוויות α הן בנות 45°, לכן:

$$B_1 = B_2 = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

$$r = \sqrt{0.02^2 + 0.02^2} = \sqrt{2}\cdot 0.02\ m$$

$$B_1 = B_2 = 2\cdot10^{-7}\frac{5}{0.02\sqrt{2}} = \frac{5}{\sqrt{2}}\cdot10^{-5}T$$

רכיבי עוצמות השדה בכיוון y מתבטלים, ובכיוון x מתקיים:

$$B_{TX} = B_{1x} + B_{2x} = 2\cdot\frac{5}{\sqrt{2}}\cdot10^{-5}\cdot\cos45° = 5\cdot10^{-5}T$$

וקטור עוצמת השדה ב-T הוא בכיוון ציר x וגודלו: $B_T = B_{TX} = 5\cdot10^{-5}T$.

13.

א. עוצמת השדה המגנטי בנקודה A היא אפס. לכן, כיוון הזרם I_2 הוא החוצה מהדף.
נחשב את עוצמת הזרם I_2:

$$B_A = B_{I_1} - B_{I_2} = \frac{\mu_0}{2\pi}\left(\frac{I_1}{r_1}-\frac{I_2}{r_2}\right) = 0$$

$$\Rightarrow \quad \frac{I_1}{r_1}-\frac{I_2}{r_2}=0 \quad \Rightarrow \quad I_2 = \frac{r_2}{r_1}\cdot I_1 = \frac{3}{9}\cdot5$$

$$\Rightarrow \quad I_2 = 1\frac{2}{3}A$$

ב. בראשית הצירים, שני הווקטורים $\vec{B}_{I_1}$ ו-$\vec{B}_{I_2}$ הם בכיוון (+y):

$$B_O = B_{I_1} - B_{I_2} = \frac{\mu_0}{2\pi}\left(\frac{I_1}{r_1}+\frac{I_2}{r_2}\right) = 2\cdot10^{-7}\left(\frac{5}{0.03}+\frac{1.67}{0.03}\right) = 4.44\cdot10^{-5}T$$

הווקטור $\vec{B}_0$ כיוונו (+y).

14. עוצמת השדה המגנטי השקול יכולה להתאפס רק בנקודה A, הנמצאת בין שני התיילים, כי רק באזור זה הווקטורים $\vec{B}_1$ ו-$\vec{B}_2$ מנוגדים בכיוונם. נסמן ב-r_1 את המרחק בין תייל מספר 1 לנקודה A. מרחק התייל השני מנקודה זו הוא $r_2 = 1.2 - r_1$.

לפי תנאיי השאלה מתקיימים:

$$B_1 - B_2 = \frac{\mu_0}{2\pi}\left(\frac{I_1}{r_1}-\frac{I_2}{r_2}\right) = 2\cdot10^{-7}\left(\frac{I_1}{r_1}-\frac{0.25I_1}{1.2-r_1}\right)=0$$

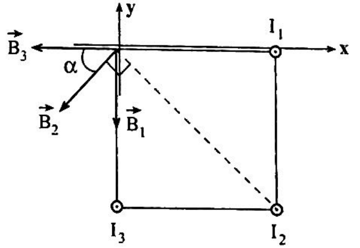
$$\Rightarrow \frac{I_1}{r_1}=\frac{0.25I_1}{1.2-r_1} \quad \Rightarrow \quad 1.2-r_1 = 0.25r_1$$

$$1.2 = 1.25r_1 \quad\Rightarrow\quad r_1 = 0.96m$$

לסיכום: הנקודה A נמצאת בין שני התיילים, במרחק $96cm$ מתייל מס' 1.

15.

א. נסמן ב-$\vec{B}_1$, $\vec{B}_2$ ו-$\vec{B}_3$ את עוצמות השדות המגנטיים של הזרמים I_1, I_2, I_3 בהתאמה. כאשר כל הזרמים יוצאים מהדף, כיווני וקטורים אלה מתוארים באיור:



$$B_1 = B_3 = \frac{\mu_0 I}{2\pi\cdot a}$$

$$B_2 = \frac{\mu_0 I}{2\pi\cdot a\sqrt2}$$

וקטור עוצמת השדה המגנטי השקול פונה בכיוונו של הווקטור $\vec{B}_2$, בזווית של $225°$ ביחס לציר x. נוסיף ל-$\vec{B}_2$ את תרומתם של הווקטורים $\vec{B}_1$ ו-$\vec{B}_3$ בכיוון הווקטור $\vec{B}_2$ ונקבל את הווקטור השקול $\vec{B}_T$:

$$B_T = B_2 + B_1\cdot\cos45° + B_3\cdot\cos45°$$

$$\cos45° = \frac{1}{\sqrt2}$$

$$B_T = \frac{\mu_0 I}{2\pi}\left(\frac{1}{a\sqrt2}+\frac{1}{a\sqrt2}+\frac{1}{a\sqrt2}\right)=\frac{3\mu_0 I}{2\pi\cdot a\sqrt2}$$

כיוונו של $\vec{B}_T$ יוצר זווית של $45°$ עם הצירים, ברביע השלישי.

ב. במקרה זה, כיווני הווקטורים $\vec{B}_1$ ו-$\vec{B}_3$ הינם במגמה מנוגדת לאלו שבסעיף א'. לכן, גודלו של הווקטור השקול הוא:

$$B_T = B_1\cdot\cos45° + B_3\cdot\cos45° - B_2$$

$$B_T = \frac{\mu_0 I}{2\pi}\left(\frac{1}{a\sqrt2}+\frac{1}{a\sqrt2}-\frac{1}{a\sqrt2}\right)=\frac{\mu_0 I}{2\pi\cdot a\sqrt2}$$

כיוונו של $\vec{B}_T$ הוא בזווית של $+45°$ ביחס לציר x שבאיור.

16.

א. בשני האיורים, עוצמת השדה המגנטי השקול יכולה להתאפס ברביע הראשון או השלישי. הסיבה לכך היא שרק ברביעים אלה שני הווקטורים של עוצמות השדה מנוגדים בכיוונם.

לכן, הישר נמצא בזווית $45°$ בין הצירים x ו-y, ברביע הראשון והשלישי.

ב. לאיור א' משוואת הישר היא: $y = x$.

באיור ב' $I_y = 2\cdot I_x$ ומרחקי נקודה מהזרמים הם y ו-x בהתאמה. בתנאיי השאלה מתקיים:

$$\frac{\mu_0\cdot I_x}{2\pi\cdot y}=\frac{\mu_0\cdot I_y}{2\pi\cdot x} \quad\Rightarrow\quad y = \frac{I_x}{I_y}\cdot x$$

לכן, המשוואה היא: $y = 0.5x$.

ג. במקרה זה מתקיים:

$$\frac{\mu_0\cdot I_x}{2\pi\cdot y}=\frac{\mu_0\cdot I_y}{2\pi\cdot x} \quad\Rightarrow\quad \frac{I_x}{3x}=\frac{I_y}{x}$$

$$\Rightarrow\quad I_y = \frac{I_x}{3}$$

17.

א. קטע התייל MN נמצא בשדה המגנטי שעוצמתו B, שנוצר על ידי הזרם בתייל KL. נתייחס לתייל KL כאל תייל אינסופי. הכוחות הפועלים על תייל MN הם:

- כוח הכובד mg
- הכוח המגנטי $F_B = BIL$

כאשר התייל MN נמצא בשיווי משקל, כוחות אלה שווים בגודלם. נביע את עוצמת השדה B של התייל MN:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi H}$$

התייל MN נמצא בשיווי משקל, לכן:

$$F_B = F_G$$

$$\frac{\mu_0 I^2 L_{MN}}{2\pi \cdot H} = mg$$

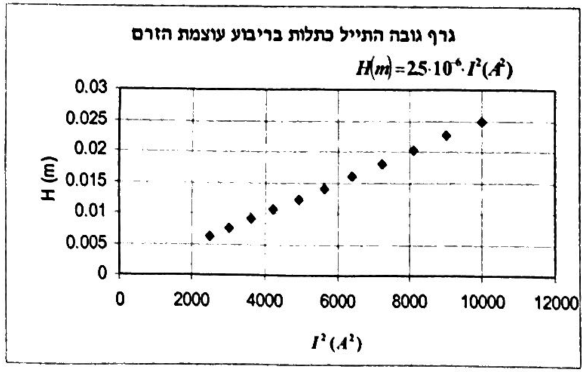
$$\Rightarrow \quad H = \frac{\mu_0 I^2 L_{MN}}{2\pi \cdot mg}$$

ב. נחשב את הגובה H שבו נמצא התייל בשיווי משקל:

$$H = \frac{\mu_0 I^2 L_{MN}}{2\pi \cdot mg} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 50^2 \cdot 1}{2\pi \cdot 8 \cdot 10^{-3} \cdot 10} = 6.25 \cdot 10^{-3} m = 6.25mm$$

ג. הערכים בטבלה הבאה חושבו לפי הביטוי $H = \frac{\mu_0 I^2 L_{MN}}{2\pi \cdot mg}$, בו הוצבו הערכים של הגדלים L_{MN}, m, g, μ_0. מצורפת טבלת ערכים וגרף הגובה $H(m)$, כתלות בריבוע עוצמת הזרם, בו התייל נמצא בשיווי משקל:

I (A)	I^2 (A^2)	H (m)
50	2500	0.006
55	3025	0.008
60	3600	0.009
65	4225	0.011
70	4900	0.012
75	5625	0.014
80	6400	0.016
85	7225	0.018
90	8100	0.020
95	9025	0.023
100	10000	0.025



ד. ערך שיפוע הגרף הוא $a = 2.5 \cdot 10^{-6}$, ויחידות השיפוע הן m/A^2.

ה. שיפוע הגרף a מבטא את הגודל:

$$a = \frac{H}{I^2} = \frac{\mu_0}{2\pi \cdot mg}$$

וממנו אפשר לחשב את הקבוע μ_0.

18. נסמן ב-$I_1 = 20A$ וב-$I_2 = 10A$.

הכריכה המלבנית נמצאת בשדה המגנטי שנוצר על ידי תייל ישר וארוך. כיוונו של עוצמת שדה זה הוא לתוך הדף (על פי כלל יד ימין).

על כל זוג נקודות סימטריות של הצלעות האנכיות, הכוחות המגנטיים פועלים במגמות מנוגדות וגודלם שווה. לכן, הם מבטלים זה את זה. רק הכוחות המגנטיים הפועלים על הצלעות האופקיות אינם מתבטלים.

לפי כלל יד שמאל, הצלע העליונה של הכריכה נמשכת לתייל והצלע התחתונה נדחית ממנו. גודל שקול הכוחות המגנטיים הפועלים על הכריכה הוא:

$$F = \frac{\mu_0 I_1 l}{2\pi}\left(\frac{I_2}{0.02} - \frac{I_2}{0.1}\right) = \frac{\mu_0 I_1 (40 I_2) l}{2\pi} = \frac{40 \cdot 20 \cdot 10 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0.22}{2\pi} = 3.52 \cdot 10^{-4} N$$

כיוונו של הכוח השקול הפועל על הכריכה הוא כלפי מעלה.

19.

א. כיוון הזרמים הוא בהתאם למופיע באיור בספר הלימוד. בין התיילים קיים כוח משיכה, דבר המתאפשר רק אם הזרמים באותה מגמה.

ב. נחשב את עוצמת השדה המגנטי שיוצר התייל העליון כתלות במרחק d ממנו:

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi \cdot d} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 120}{2\pi \cdot d} = \frac{2.4 \cdot 10^{-5}}{d}$$

כאשר עוצמת הזרם בתייל התחתון היא $120A$, הקפיצים מכווצים ב-$\Delta y = 7cm$ והמרחק בין התיילים הוא $1cm$. במצב זה הכוחות הפועלים על התייל התחתון הם:

- mg - כוח הכובד; כיוונו כלפי מטה.
- $B_1 I_2 L$ - הכוח המגנטי; כיוונו כלפי מעלה.
- $F_{SP} = 4k\Delta y$ - הכוחות שהקפיצים מפעילים על התייל התחתון; כיוונם כלפי מטה.

לכן, לפי החוק השני של ניוטון, מתקיים:

$$B_1 I_2 L = mg + 4k\Delta y$$

$$\frac{2.4\cdot10^{-5}\cdot120\cdot10}{0.01} = mg + 4\cdot0.07k$$

$$(1) \qquad 2.88 - 0.28k = mg$$

כאשר עוצמת הזרם בתייל התחתון היא $50A$, הקפיצים מתוחים ב-$\Delta y' = 4cm$, לכן הם מפעילים כוחות כלפי מעלה. במקרה זה, לפי החוק השני של ניוטון, מתקיים:

$$B_1 I_2' L + 4k\Delta y' = mg$$

$$\frac{2.4\cdot10^{-5}\cdot50\cdot10}{0.12} + 4\cdot0.04k = mg$$

$$(2) \qquad 0.1 + 0.16k = mg$$

ממשוואות (1) ו-(2) מתקבל:

$$2.88 - 0.28k = 0.1 + 0.16k$$

$$k = \frac{2.78}{0.44} = 6.32N/m$$

ג. נציב את הערך שהתקבל עבור קבוע הקפיץ במשוואה 2 ונקבל:

$$m = \frac{0.1 + 0.16\cdot6.32}{10} = 0.11kg$$

ד. עם הפסקת הזרם I_2, הכוחות הפועלים על התייל התחתון הם כוח הכובד והכוחות המופעלים על ידי הקפיצים. לכן, התנועה שתתקבל היא תנועה הרמונית פשוטה.

ה. זמן מחזור התנועה הוא:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{4k}} = 2\pi\sqrt{\frac{0.11}{4\cdot6.32}} \approx 0.4s$$

.20

א. על פי הפתרון בתרגיל 18, יש להתחשב רק בכוחות הפועלים על הצלעות האופקיות של הריבוע. כאשר $I = 0$, מתקיים:

$$(1) \qquad mg = kb$$

כי הקפיץ מתוח בשיעור b יחסית למצבו הרפוי.

כאשר מזרימים זרם בתייל, הקפיץ רפוי והמסגרת נמצאת בשיווי משקל בהשפעת כוח הכובד (המכוון בכיוון מטה) והכוח המגנטי השקול (המכוון כלפי מעלה). לכן מתקיים:

$$mg = \frac{\mu_0 I\cdot I\cdot a}{2\pi}\left(\frac{1}{b} - \frac{1}{a+b}\right)$$

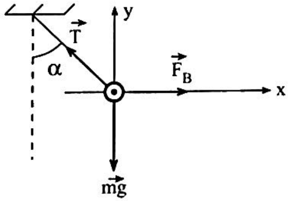
$$mg = \frac{\mu_0 I^2\cdot a}{2\pi}\cdot\frac{a}{(a+b)\cdot b}$$

$$(2) \qquad m = \frac{\mu_0 I^2\cdot a^2}{2\pi\cdot g(a+b)}$$

ב. מהביטויים (1) ו-(2) נובע:

$$k = \frac{mg}{b} = \frac{\mu_0 I^2\cdot a^2}{2\pi\cdot(a+b)\cdot b^2}$$

21. באיור מתוארים, במבט מלפנים, המוט והכוחות שפועלים עליו.



א. המוט נמצא במצב של שיווי משקל. לכן:

$$T\sin\alpha = BIL$$

$$T\cos\alpha = mg$$

$$\Rightarrow \qquad \tan\alpha = \frac{BIL}{mg}$$

$$\tan\alpha = \frac{6.25\cdot10^{-3}\cdot35\cdot0.25}{2\cdot10^{-3}\cdot10} = 2.734$$

$$\Rightarrow \qquad \alpha = 69.91°$$

ב. אילו המוט היה תלוי במרכזו על חוט יחיד, ערך המתיחות בחוט זה היה:

$$T = \frac{mg}{\cos\alpha} = \frac{2\cdot10^{-3}\cdot10}{\cos69.91°} = 5.82\cdot10^{-2}N$$

מתיחות זו מתחלקת למעשה בין שני החוטים. לכן, בפועל המתיחות בכל אחד מהחוטים היא $T/2 = 2.91\cdot10^{-2}\,N$.

ג. הביטוי פותח בפתרון לסעיף א'.

ד. כדי שהזווית α תהיה בת 90°, צריכה עוצמת הזרם להיות אין סופית. דבר זה אינו אפשרי.

שדה מגנטי של כריכה מעגלית ושל סליל דק

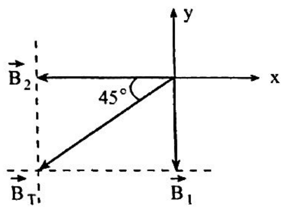
22. הביטוי לחישוב גודל עוצמת השדה המגנטי במרכזו של סליל מעגלי דק הוא:

$$B = \frac{N\mu_0 I}{2R}$$

במקרה הנתון $N = 1$ ולכן:

$$R = \frac{\mu_0 I}{2B} = \frac{4\pi\cdot10^{-7}\cdot12.5}{2\cdot2\cdot10^{-4}} = 3.93\cdot10^{-2}\,m = 3.93\,cm$$

23. על פי כלל יד שמאל, הזרם בכריכה האופקית יוצר שדה מגנטי שעוצמתו $\vec{B}_1$ וכיוונו כלפי מטה (-y). הזרם בכריכה האנכית יוצר שדה מגנטי שעוצמתו $\vec{B}_2$ וכיוונו שמאלה. עוצמות השדות זהות, לכן, כיוון וקטור עוצמת השדה המגנטי השקול $\vec{B}_T$ הוא בזווית של 45° מתחת לציר (-x).



$$B_1 = B_2 = B = \frac{\mu_0 I}{2R} = \frac{4\pi\cdot10^{-7}\cdot1.6}{2\cdot0.05} = 2.01\cdot10^{-5}\,T$$

$$B_T = \sqrt{B_1^2 + B_2^2} = B\sqrt{2} = 2.01\cdot10^{-7}\cdot\sqrt{2} = 2.84\cdot10^{-5}\,T$$

24. על פי הביטוי לחישוב עוצמת השדה המגנטי בסליל מתקבל:

$$B = \frac{N\mu_0 I}{2R}$$

$$I = \frac{2RB}{N\mu_0} = \frac{2\cdot0.07\cdot5\cdot10^{-6}}{30\cdot4\pi\cdot10^{-7}} = 1.86\cdot10^{-2}\,A$$

25. בדומה לפתרון לתרגיל 23, גם בפתרון תרגיל זה ניישם את עיקרון הסופרפוזיציה של שני שדות מגנטיים:

- זרם הכריכה המעגלית יוצר במרכזה שדה מגנטי שעוצמתו $\vec{B}_1$ מכוונת לתוך הדף.
- במרכז הכריכה זרם התייל הישר יוצר שדה מגנטי שעוצמתו $\vec{B}_2$ מכוונת החוצה מהדף.

גודל עוצמת השדה שנוצר על ידי הזרם בכריכה הוא:

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2R}$$

גודל עוצמת השדה של התייל הארוך במרכז הכריכה הוא:

$$B_2 = \frac{\mu_0\cdot I_2}{2\pi\cdot d}$$

במרכז הכריכה מתקיים $B_1 = B_2$.

לכן:

$$\frac{\mu_0 I_1}{2R} = \frac{\mu_0\cdot4.5 I_1}{2\pi\cdot d}$$

$$d = \frac{4.5R}{\pi} \approx 1.43R$$

26. הביטוי לגודל עוצמת השדה המגנטי שנוצר על ידי זרם בכריכה מעגלית הוא:

$$B_1 = \frac{\mu_0 I}{2R}$$

הביטוי לגודל עוצמת השדה המגנטי שנוצר סביב זרם בתייל ארוך מאוד הוא:

$$B_2 = \frac{\mu_0\cdot I}{2\pi\cdot d}$$

במרכז הכריכה מתקיים: $B_1 = B_2$. לכן:

$$\frac{\mu_0 I}{2R} = \frac{\mu_0 I}{2\pi\cdot d} \quad\Rightarrow\quad R = \pi\cdot d$$

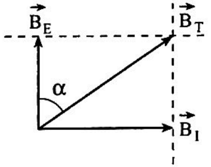
$$d = \frac{R}{\pi} = \frac{12}{\pi} = 3.82\,cm$$

.27

א. עוצמת השדה המגנטי במרכז סליל מעגלי דק ניתנת על ידי הביטוי:

$$B_I = \frac{N\mu_0 I}{2R}$$

עוצמת שדה הסליל ניצבת לרכיב האופקי של עוצמת השדה המגנטי הארצי $\vec{B}_E$, כמתואר באיור.



הווקטורים באיור מאונכים זה לזה. לכן:

$$\tan\alpha = \frac{B_I}{B_E} = \frac{N\mu_0 I/2R}{B_E} = \frac{N\mu_0 I}{B_E \cdot 2R}$$

$$I = \frac{2B_E R\tan\alpha}{N\mu_0}$$

ב.

$$I = \frac{2\cdot 3\cdot 10^{-5}\cdot 0.11\cdot \tan 30^\circ}{24\cdot 4\pi\cdot 10^{-7}} = 0.126A$$

.28

א. אחרי זמן רב, עוצמת הזרם בסליל (סילונית ארוכה) היא:

$$I = \frac{\varepsilon}{R+r} = \frac{4.5}{1.5+0.25} = 2.57A$$

ב. נחשב את צפיפות הכריכות ליחידת אורך:

$$n = \frac{N}{L} = \frac{500}{0.25} = 2000\,m^{-1}$$

ג. גודל עוצמת השדה המגנטי במרכז הסליל הוא:

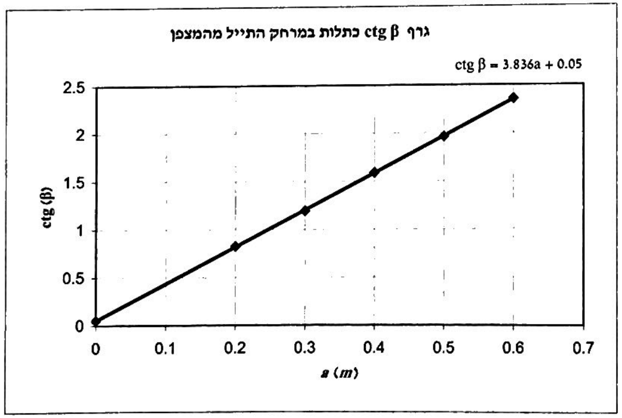
$$B = \mu_0\frac{N}{L}I = \mu_0 nI = 4\pi\cdot 10^{-7}\cdot 2000\cdot 2.57 = 6.46\cdot 10^{-3}T$$

.29

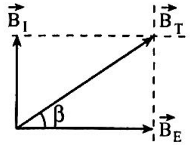
א.

ctg (β)	β°	a (m)
0.824	50.5	0. 2
1.192	40.0	0. 3
1.588	32.2	0. 4
1.963	27.0	0. 5
2.356	23.0	0. 6

ב.



ג. מחט המצפן מצביעה לכיוון עוצמת השדה המגנטי השקול. עוצמת השדה מתקבלת על ידי חיבור ווקטורי של $\vec{B}_E$, הרכיב האופקי של עוצמת השדה המגנטי של הארץ, ועוצמת השדה המגנטי $\vec{B}_I$ - שנוצר על ידי הזרם בתייל $\vec{B}_E$. לפי המתואר בשאלה, $\vec{B}_E$ מקביל לתייל ו- $\vec{B}_I$ מכוון בניצב לו. (באיור שבתרגיל, כיוונו הוא לתוך הדף).



במקרה זה מתקיים:

$$ctg\beta = \frac{B_E}{B_I} = \frac{B_E}{\mu_0 I/2\pi\cdot a} = \frac{2\pi\cdot a\cdot B_E}{\mu_0 I}$$

שיפוע הגרף מייצג את הערך:

$$\frac{ctg\beta}{a}=\frac{2\pi\cdot B_E}{\mu_0 I}$$

לכן:

$$B_E=\left(\frac{cfg\beta}{a}\right)\cdot\frac{\mu_0 I}{2\pi}=\frac{3.836\cdot 4\pi\cdot 10^{-7}\cdot 3}{2\pi}=2.3\cdot 10^{-6}T$$

ד. במצב המתואר, במקום שבו מוצב המצפן, עוצמת השדה המגנטי שנוצר על ידי שני התיילים היא $\bar{B}_T$. נמצא את עוצמת הזרם בתייל הנוסף בעזרת הביטוי שפיתחנו בסעיף א':

$$B_T=B_1-B_2=\frac{\mu_0}{2\pi}\left(\frac{I_1}{r_1}-\frac{I_2}{r_2}\right)=2\cdot 10^{-7}\left(\frac{3}{0.2}-\frac{I_2}{0.7}\right)$$

$$ctg\beta=\frac{B_E}{B_T}$$

$$B_T=\frac{B_E}{ctg\beta}=\frac{2.3\cdot 10^{-6}}{ctg30°}=1.33\cdot 10^{-6}T$$

כלומר:

$$2\cdot 10^{-7}\left(\frac{3}{0.2}-\frac{I_2}{0.7}\right)=1.33\cdot 10^{-6}\quad\Rightarrow\quad\frac{3}{0.2}-\frac{I_2}{0.7}=6.65$$

$$(15-6.65)\cdot 0.7=I_2\quad\Rightarrow\quad I_2=5.85A$$

30.

א. כיוון עוצמת השדה המגנטי הנוצר על ידי שני התיילים בנקודה A הוא בהתאם לכיוון עוצמת השדה המגנטי של התייל העליון, כי עוצמת הזרם בו גדולה יותר. לפי כלל יד ימין, כיוון זה הוא לתוך הדף. לכן, מגמת הזרם בסליל היא נגד מגמת הסיבוב של מחוגי השעון (כדי ליצור ב-A וקטור עוצמת שדה היוצא מהדף).

ב. תרומת התיילים לעוצמת השדה המגנטי בנקודה A היא:

$$B_T=B_1-B_2=\frac{\mu_0}{2\pi}\left(\frac{I_1}{r_1}-\frac{I_2}{r_2}\right)=2\cdot 10^{-7}\left(\frac{12}{0.09}-\frac{8}{0.09}\right)=8.89\cdot 10^{-6}T$$

נחשב את עוצמת הזרם בסליל. במרכז הסליל גודל עוצמת השדה B_s (הנוצר על ידי זרם הסליל) הוא כגודל עוצמת השדה הנוצר על ידי התיילים, $8.89\cdot 10^{-6}T$.

$$B_S=\frac{N\mu_0 I}{2R}\Rightarrow I=\frac{B_s\cdot 2R}{N\mu_0}$$

$$I=\frac{8.89\cdot 10^{-6}\cdot 2\cdot 0.03}{8\cdot 4\cdot\pi\cdot 10^{-7}}=5.3\cdot 10^{-2}A$$

פרק 9 – השראה אלקטרומגנטית

הקדמה

השראה אלקטרומגנטית - דגשים מתוך הסילבוס החדש (17 שעות)

- הכא"מ המושרה הוא תוצאה של הפרדת מטענים, שנוצרה על ידי כוח לורנץ או משדה חשמלי שנוצר על ידי שדה מגנטי משתנה בזמן.
- העבודה החשמלית המתפתחת במעגל שווה לעבודת הכוח החיצוני שגורם לשינוי השטף במעגל חשמלי בו נוצר זרם מושרה.

כא"מ מושרה חוק פארדיי וחוק לנץ (10 שעות)

א. בתהליכים המתוארים בפרק זה נוצר תמיד כא"מ מושרה ולא בהכרח זרם מושרה. כדי שייווצר זרם מושרה, המעגל צריך להיות סגור. במעגל הפתוח יש זרם מושרה רגעי בלבד, בשלב הפרדת המטענים.

ב. כא"מ מושרה נוצר כאשר השטף המגנטי דרך המעגל החשמלי משתנה. הכא"מ המושרה יוצר זרם מושרה במעגל סגור, המעכב את סיבת יצירתו. זוהי תמצית חוק לנץ.

ג. שני תהליכים שונים יכולים לגרום לשינוי השטף המגנטי דרך מעגל חשמלי:

1. תנועה יחסית בין מעגל חשמלי לבין שדה מגנטי; במקרה זה הכא"מ המושרה הוא תוצאה של כוח לורנץ הפועל על חלקי המעגל הנמצאים בתנועה יחסית לשדה המגנטי.
2. המעגל החשמלי במנוחה יחסית לשדה המגנטי, אולם השדה המגנטי משתנה בעוצמתו, בכיוונו או בשניהם.

ד. למרות אופיים השונה של שני תהליכים אלה, הביטוי $\varepsilon=-\frac{d\Phi_B}{dt}$ מבטא את הכא"מ המושרה. במילים אחרות, בכל אחד מהמקרים, הכא"מ המושרה שווה לקצב שינוי השטף המגנטי דרך המעגל.

ה. עיקר השימוש בחוק לנץ הוא בקביעת כיוון הזרם המושרה.

ו. חוק לנץ מבטא למעשה את חוק שימור האנרגיה. את חוק לנץ ניתן להדגים בדרכים שונות. אחת המרהיבות שבהן היא נפילת מגנט בצינור אלומיניום.

יישומים טכנולוגיים (3 שעות)

א. שנאי – נימוק איכותי בלבד ליחס $\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}=\frac{N_2}{N_1}$. יחס זה מסתמך על חוק שימור האנרגיה ועל מושג הכא"מ המושרה. שנאי בהקשר להעברת אנרגיה למרחקים.

ב. גנרטור – יצירת כא"מ מושרה בסליל מסתובב בשדה מגנטי.

ג. זרם חילופין, מושגי יסוד.

על פי הסילבוס, מומלץ לדון במושג "השראה עצמית" ובמשוואות מקסוול בהיקף כולל של 4 שעות.

פתרונות לתרגילים

הערה: כאשר מוט נע בשדה מגנטי אחיד, בניצב לכיוון השדה המגנטי, נוצר קיטוב בין קצותיו. מומלץ לקרוא את סעיף 9.2 בספר הלימוד, המוקדש כולו לנושא זה. הקורא מוזמן לברר לעצמו היטב את השיקולים העומדים מאחורי איור 5, הפותח את סעיף 9.2 בספר הלימוד.

.1

א. גודל הכא"מ המושרה שנוצר בקצה המוט הוא:

$$\varepsilon = Blv = 1.8\cdot 0.7\cdot 3 = 3.78V$$

ב. כתוצאה מתנועת המוט בשדה המגנטי, נוצר בו קיטוב כך שבקצה b מתרכזים מטענים שליליים. לכן, הפוטנציאל גבוה יותר בקצה a של המוט.

.2

א. כאשר המוט נע ימינה מתקיים:

$$\varepsilon = Blv = 0.3\cdot 1.2\cdot 4 = 1.44V$$

ב. גם כאשר המוט נע שמאלה, הכא"מ בקצותיו הוא $1.44V$, לפי הביטוי בסעיף א'.

ג. במקרה זה, המוט הנע אינו חוצה קווי שדה מגנטיים; לכן, הכא"מ בקצותיו הוא אפס.

3. שאלה זו מקיפה מגוון מצבים המתארים תנועת מוט בשדה מגנטי אחיד. פתרון תרגיל זה עשוי ליצור הבנה מקיפה לגבי השימוש הנכון בקשר $\varepsilon = Blv$.

א. הפוטנציאל בקצה a של המוט גדול יותר מזה שבקצה b, והכא"מ בין קצות המוט הוא:

$$\varepsilon = Blv = 0.03\cdot 1.5\cdot 8 = 0.36V$$

ב. התשובה זהה לתשובה בסעיף א'.

ג. הפוטנציאל בקצה a של המוט גדול יותר מזה שבקצה b, והכא"מ בין קצות המוט הוא:

$$\varepsilon = Blv = 0.03\cdot 1.5\cdot 8 = 0.36V$$

גם במקרה זה הזווית בין הווקטורים $\vec{v}$ ו- $\vec{B}$ היא 90°.

ד. הפוטנציאל בקצה a של המוט גדול יותר מזה שבקצה b, והכא"מ בין קצות המוט הוא:

$$\varepsilon = Blv = 0.03\cdot 1.5\cdot 8 = 0.36V$$

ה. במקרה זה, גודל רכיב השדה המגנטי הניצב למוט הוא $B\sin\alpha = B\sin 60^\circ$. לכן:

$$\varepsilon = (B\sin 60^\circ)\cdot lv = 0.03\cdot 0.866\cdot 1.5\cdot 8 = 0.31V$$

גם במקרה זה, הפוטנציאל של קצה המוט המסומן "a" גבוה יותר.

4. המוט המתואר נע בשדה מגנטי אחיד שעוצמתו ניתנת לחישוב מהקשר הבא:

$$\varepsilon = Blv \quad \Rightarrow \quad B = \frac{\varepsilon}{lv}$$

$$B = \frac{2}{0.5\cdot 8} = 0.5T$$

.5

א. נחשב את מהירות המוט:

$$\varepsilon = Blv \quad \Rightarrow \quad v = \frac{\varepsilon}{Bl} = \frac{1.2}{0.8\cdot 0.5} = 3m/s$$

על פי כיוון השדה המגנטי והזרם המסומנים בתרשים, אפשר להבין שכיוון מהירות המוט הוא ימינה.

ב. נחשב את עוצמת הזרם על פי השיקולים שלמדנו בפרק 2. תזכורת: עוצמת הזרם החשמלי במעגל המכיל נגד שהתנגדותו R וסוללה שהתנגדותה r, מחושבת על פי הביטוי הבא:

$$I = \frac{\varepsilon}{R+r}$$

$$I = \frac{\varepsilon}{R+r} = \frac{1.2}{6} = 0.2A$$

ג. כיוונו של הכוח שהשדה המגנטי מפעיל על המוט מנוגד תמיד לכיוון מהירות המוט. טענה זו כללית במהותה והיא נשענת על הנימוק הבא:

- אילו כיוון הכוח המגנטי היה בכיוון מהירות המוט, כל דחיפה קלה של המוט הייתה גורמת להאצת המוט בשדה המגנטי, וליצירת זרם חשמלי שעוצמתו הולכת וגדלה.
- גידול המהירות והזרם החשמלי ללא ביצוע עבודה של כוחות חיצוניים, הוא דבר העומד בסתירה לחוק שימור האנרגיה.

אם מהירות המוט קבועה, גודל הכוח הפועל על המוט הוא:

$$F = BIl = 0.8\cdot 0.2\cdot 0.5 = 0.08N$$

6.

א. על פי כלל יד שמאל, כיוונו של וקטור השדה המגנטי הוא לתוך הדף.

ב. כיוונו של הכוח החיצוני F_{EXT} המקיים את תנועת המוט במהירות קבועה הוא בכיוון מהירות המוט. כיוונו של כוח זה הוא שמאלה. נחשב את גודלו של F_{EXT}. בהתחשב בכך שהתנועה קצובה, הכוח השקול הפועל על המוט הוא אפס. כלומר, הכוח החיצוני שווה בגודלו לכוח המגנטי:

$$F_{EXT} = BIl = B\frac{Bvl}{R}l = \frac{B^2vl^2}{R} = \frac{2^2\cdot 4\cdot 0.6^2}{10} = 0.576N$$

ג. במשך שנייה אחת, המוט התקדם מרחק של $\Delta x = v\cdot t = 4m$. לכן גודל עבודת הכוח F_{EXT} הוא:

$$W = F_{EXT}\cdot \Delta x = 0.576\cdot 4 = 2.30J$$

ד. עבודתו של הכוח החיצוני הופכת לאנרגיה פנימית במערכת ומתבטאת בהתחממות הנגד. הספק החום הנוצר בנגד הוא $2.30W$, כי זו העבודה שנעשתה על ידי הכוח F_{EXT} במשך שנייה אחת.

7.

א. עוצמת הזרם במוט היא:

$$I = \frac{Blv}{R} = \frac{0.7\cdot 0.12\cdot 4}{3} = 0.112A$$

ב. על פי כלל יד שמאל, כיוון הזרם במוט הוא כלפי מעלה (מ-H ל-G).

ג. כיוונו של הכוח החיצוני המקיים את תנועת המוט הוא בכיוון המהירות, כלומר שמאלה (או, בכיוון המנוגד לכוח המגנטי שפועל על התייל). גודל הכוח החיצוני הוא:

$$F_{EXT} = BIl = 0.7\cdot 0.112\cdot 0.12 = 9.41\cdot 10^{-3}N$$

8.

א. כיוון הזרם נקבע על פי הקוטביות של הדקי הסוללה. במקרה המתואר, כיוון הזרם במוט הוא כלפי מעלה, מ-L אל K. עוצמת הזרם היא: $I = \frac{\varepsilon}{R}$.

ב. כתוצאה מהזרם החשמלי במוט, השדה המגנטי דוחף את המוט שמאלה. היות שהמוט נמצא במנוחה, הכוח החיצוני מכוון ימינה וגודלו הוא:

$$F = BIl = \frac{B\cdot \varepsilon\cdot d}{R}$$

ג. בהתאם לפתרון שהוצג בסעיף ב', המוט ינוע שמאלה.

ד. כתוצאה מתנועת המוט, על פי כלל יד שמאל, המתח ε שנוצר בין קצות המוט מנוגד לכא"מ הסוללה. כלומר, כתוצאה מהקיטוב במוט, הקצה L חיובי והקצה K שלילי. לכן, עוצמת הזרם קטנה יותר בהשוואה למצב שבו המוט היה במנוחה.

ה. עוצמת הזרם תגדל. במצב המתואר, כא"מ הסוללה וכא"מ המוט הם באותה מגמה. (עתה הקצה L שלילי כתוצאה מהקיטוב).

9.

א. גודל הכא"מ שנוצר בין קצות המוט הוא:

$$\varepsilon = Bvl = 0.1\cdot 2\cdot 0.5 = 0.1Volt$$

ב. על פי כלל יד שמאל, הפוטנציאל בקצה העליון של המוט גבוה יותר מאשר בקצהו התחתון ולכן כיוון הזרם בכל אחד מהנגדים הוא כלפי מטה. בהנחה שהתנגדות המוט הנע זניחה, עוצמות הזרמים הן:

$$I_1 = \frac{\varepsilon}{R_1} = \frac{0.1}{2} = 0.05A$$

$$I_2 = \frac{\varepsilon}{R_2} = \frac{0.1}{4} = 0.025A$$

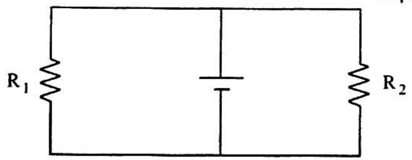
ג. על פי כלל הצומת, עוצמת הזרם במוט היא סכום עוצמות הזרמים בנגדים. לכן עוצמת הזרם במוט היא $I_{מוט} = I_1 + I_2 = 0.075A$. כיוון הזרם במוט הוא כלפי מעלה.

ד. כיוון הכוח החיצוני המניע את המוט הוא ימינה, בכיוון תנועת המוט. גודלו של כוח זה הוא:

$$F_{EXT} = BIl = 0.1\cdot 0.075\cdot 0.5 = 3.75\cdot 10^{-3}N$$

(ראה נימוק בפתרון תרגיל 6 סעיף א').

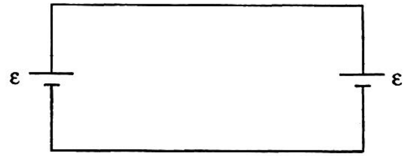
ה. מצורף המעגל השקול:



.10

א. בין הקצוות של כל אחד מהמוטות נוצר כא"מ מושרה שגודלו: $\varepsilon = BLv$.

ב. עוצמת הזרם במעגל היא אפס, נוצר מעגל שקול לשתי סוללות זהות שחוברו במגמות מנוגדות זו לזו.

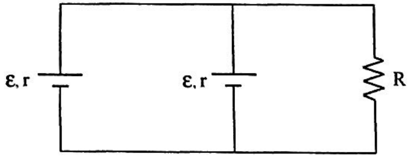


ג. בהנחה שלמוטות התנגדות זניחה, עוצמת הזרם בנגד היא:

$$I=\frac{\varepsilon}{R}=\frac{BLv}{R}$$

(הערה: אם למוטות התנגדות r, הפתרון שמתקבל זהה לפתרון המוצג בסעיף ד' בשאלה זו).

ד. מצורף המעגל השקול:



על פי נתוני השאלה, עוצמת הזרם היא:

$$I=\frac{\varepsilon}{R+r/2}=\frac{BLv}{R+r/2}$$

כיוון הזרם בנגד הוא כלפי מטה.

.11

א. התנגדות המעגל כפונקציה של הזמן נתונה בביטוי הבא:

$$R=\lambda L+2\lambda(x_0+vt)$$

ב. הכא"מ במעגל הוא $\varepsilon = BvL$.

ג. על פי חוק אוהם, הביטוי לעוצמת הזרם במעגל הוא:

$$I=\frac{\varepsilon}{R}=\frac{BvL}{\lambda L+2\lambda(x_0+vt)}$$

כפי שאפשר לראות מהביטוי בסעיף א' (או מהמכנה של הביטוי האחרון), התנגדות המעגל הולכת וגדֵלה עם הזמן. לכן, עוצמת הזרם הולכת וקטֵנה עם הזמן.

ד. כיוון הזרם במוט הוא כלפי מעלה ובמעגל החשמלי, כיוונו הוא בניגוד למגמת הסיבוב של מחוגי השעון.

ה. כדי שהמוט ינוע במהירות קבועה v, יש להפעיל עליו כוח חיצוני F_{EXT}. ניתן לחשב את גודלו של הכוח הזה על ידי הביטוי:

$$F_{EXT}=BIL=B\cdot\frac{BvL}{\lambda L+2\lambda(x_0+vt)}\cdot L=\frac{B^2vL^2}{\lambda L+2\lambda(x_0+vt)}$$

ו. מהביטוי האחרון אפשר לראות שגודל הכוח החיצוני הנחוץ כדי לקיים את תנועת המוט במהירות קבועה v קטֵן (ערך המונה קבוע, וערך המכנה הולך וגדֵל עם הזמן).

.12

א. קווי השדה המגנטי מקבילים למישור הכריכה, לכן, גודל השטף המגנטי הוא אפס.

ב. גודל השטף המגנטי הוא:

$$\Phi = B\cdot a^2$$

ג. באיור זה, הכריכה נוטה בזווית של 45° ביחס לכיוון קווי השדה המגנטי. לכן:

$$\Phi = Ba^2\cdot\cos 45^\circ = Ba^2\frac{\sqrt{2}}{2}\approx 0.71Ba^2$$

.13

א. שטחי הכריכות הריבועיות שאורכי צלעותיהן a ו-$2a$ בהתאמה, הם a^2 ו- $(2a)^2 = 4a^2$ בהתאמה. לכן, ערכי השטף המגנטי בכריכות הריבועיות הם :

$$\Phi_a = Ba^2$$

$$\Phi_{2a} = B(2a)^2 = B\cdot 4a^2 = 4\Phi_a$$

שטחי הכריכות המעגליות שרדיוסיהן a ו-$2a$, הם πa^2 ו- $\pi(2a)^2 = 4\pi a^2$ בהתאמה. לכן, ערכי השטף המגנטי בכריכות המעגליות הם :

$$\Phi_a = B\pi\cdot a^2$$

$$\Phi_{2a} = B4\pi\cdot a^2 = 4\Phi_a$$

ב. עם הכפלת עוצמת השדה המגנטי פי 2, השטף המגנטי דרך הכריכות גדֵל פי 2 כי לפי התשובות בסעיף א', כל אחד מהשטפים משתנה ביחס ישר לגודל עוצמת השדה המגנטי.

ג. על פי הפתרון לתרגיל 12-ג', כאשר הכריכה בעלת שטח S מסתובבת בזווית θ יחסית למצב המתואר בשאלה, גודל השטף המגנטי דרכה הוא:

$$\Phi = BS\cdot\cos\theta = Ba^2\cdot\cos\theta = \Phi_0\cos\theta$$

נבדוק את גודל הזווית שעבורה ערך השטף המגנטי קטֵן למחצית מערכו ההתחלתי:

$$\frac{1}{2}\Phi_0 = \Phi_0\cos\theta$$

$$\cos\theta = 0.5 \quad\Rightarrow\quad \theta = 60^\circ$$

פתרון זה הוא כללי והוא נכון לגבי שינוי השטף המגנטי בכל אחת מהכריכות בשאלה.

ד. על פי הפתרון שהוצג בסעיף הקודם, כדי להקטין את השטף המגנטי ל-0.2 מערכו ההתחלתי, יש לסובב את הכריכה כך שהזווית תהיה:

$$\cos\theta = 0.2 \quad\Rightarrow\quad \theta = 78.46^\circ.$$

ה. הגורמים שקובעים את גודל השטף המגנטי דרך כריכה הנמצאת בשדה מגנטי אחיד הם:

1) עוצמת השדה המגנטי;

2) שטח הכריכה;

3) הזווית בין וקטור השדה המגנטי לבין מישור הכריכה.

.14

א. הערה: השטף המגנטי דרך N כריכות צמודות הוא המכפלה של השטף Φ דרך כריכה בודדת. נחשב את השטף המגנטי דרך כריכות הסליל המעגלי:

$$\Phi = NBS = 25\cdot 0.4\cdot\pi\cdot 0.12^2 = 0.45Wb$$

ב. בהנחה שבהתחלה מישור הסליל היה מאונך לשדה המגנטי, במשך 2 שניות הכריכה הסתובבה בזווית של 90°. לאחר הסיבוב, מישור הכריכה מתלכד עם קווי השדה המגנטי.

ג. לפי הגדרת המהירות הזוויתית מתקיים:

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{\pi/2}{2} = \frac{\pi}{4} = 0.78 rad/s$$

.15

א. השטף המגנטי בזמן $t_0 = 0$ הוא:

$$\Phi_0 = Bx_0L$$

ב. השטף המגנטי כתלות בזמן ניתן על ידי הביטוי הבא:

$$\Phi(t) = BL(x_0 + vt)$$

ג. נבטא את השינוי בשטף המגנטי, $\Delta\Phi$, בפרק הזמן הנדון:

$$\Delta\Phi = \Phi(t) - \Phi_0 = BL(x_0 + vt) - Bx_0L = BLvt$$

ד. פרק הזמן בו התרחש השינוי בשטף המגנטי הוא $\Delta t = t$. לכן:

$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{BLv\Delta t}{\Delta t} = BLv$$

ה. אפשר לחשב את הכא"מ המושרה באמצעות הביטוי $\varepsilon = BLv$ כאשר מתקיימים התנאים הבאים:

1) המוט נע בשדה מגנטי אחיד.

2) האורך L של קטע המוט בו מושרה כא"מ, נשאר קבוע (ראה שאלות 28,37 בספר הלימוד, שם אין תנאי זה מתקיים).

3) מהירות המוט v קבועה.

ו. נתאים את הביטוי שפותח בסעיף ב' למקרה שהתנועה היא שוות תאוצה. מתקבל:

$$\Phi(t) = BL(x_0 + \frac{at^2}{2})$$

.16

א. נסמן את השטף המגנטי ההתחלתי ב-Φ_i, ואת השטף המגנטי, לאחר שהשדה החליף את כיוונו, ב-Φ_f. מנתוני השאלה מתקיים הקשר $\Phi_i = -\Phi_f$. הערכים המוחלטים של Φ_i ושל Φ_f שווים בגודלם לשטף המגנטי המכסימלי בכריכה.

כתוצאה מהשינוי בכיוון השדה המגנטי בסליל, נוצר בו כא"מ המושרה. הערך הממוצע של הכא"מ המושרה הוא:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{\Phi_f - \Phi_i}{\Delta t} = \frac{\Phi_f - (-\Phi_f)}{\Delta t} = \frac{2\Phi_f}{\Delta t} = \frac{2\Phi_{MAX}}{\Delta t}$$

נביע את עוצמת הזרם הממוצעת בנגד, ובעזרתה נחשב את המטען שעבר בו:

$$I = \frac{\varepsilon}{R+r}$$

$$q = I\Delta t = \frac{\varepsilon}{R+r}\Delta t = \frac{2\Phi_{MAX}\Delta t}{(R+r)\Delta t} = \frac{2\Phi_{MAX}}{R+r}$$

$$q = \frac{2\cdot NBS}{R+r} = \frac{2\cdot 150\cdot 0.25\cdot(\pi\cdot 0.08^2)}{4+2} = 0.251C$$

ב. במשך הזמן שהשדה המגנטי מחליף כיוון, עוצמת הזרם הממוצעת בסליל היא:

$$I=\frac{\Delta q}{\Delta t}=\frac{0.251}{0.01}=25.1A$$

ג. האנרגיה שנדרשה כדי להפוך את כיוון השדה המגנטי של הסליל מומרת בסופו של דבר לחום בסליל ובנגד. לכן:

$$E_{energy}=I^2(R+r)\Delta t=25.1^2\cdot(4+2)\cdot 0.01=37.8J$$

.17

א. בהתחלה, השטף המגנטי בסליל הוא אפס. לאחר הסיבוב, ערכו של השטף המגנטי בסליל הוא הערך הגדול ביותר האפשרי במערכת המתוארת. לכן:

$$\varepsilon=\frac{N\Delta\Phi}{\Delta t}=\frac{N(\Phi_{MAX}-0)}{\Delta t}=\frac{NBS}{\Delta t}$$

$$\Rightarrow\quad \varepsilon=\frac{2000\cdot 5\cdot 10^{-5}\cdot\pi\cdot 0.12^2}{0.005}=0.905V$$

ב. עבור שינוי זהה בערך השטף המגנטי, בסליל מסויים, הכא"מ המושרה הוא ביחס הפוך לפרק הזמן בו מתבצע השינוי בשטף המגנטי. לכן:

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}=\frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}\quad\Rightarrow\quad \Delta t_2=\Delta t_1\cdot\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}=0.005\frac{0.905}{6}=7.54\cdot 10^{-4}s$$

הערה: הזמן הקצר שהתקבל, מראה על קצב סיבוב מהיר מאוד. ההשלכה המעשית היא, שגנרטור הפועל באמצעות השדה המגנטי הארצי, אינו מתאים במיוחד ליצירת ערכי מתח גדולים.

לפני שפותרים את התרגילים 18-23, מומלץ לקרוא את סעיף 9.4 בספר הלימוד הדן בצורה מפורטת בחוק לנץ ובמשמעותו.

.18

א. על פי חוק לנץ, כיוון הזרם המושרה הוא נגד מגמת הסיבוב של מחוגי השעון (כך שנוצר שדה מגנטי מושרה שכיוונו החוצה מהדף).

ב. זהו המקרה ההפוך למצב המתואר בסעיף הקודם. לכן, על פי אותם שיקולים, כיוון הזרם הוא במגמת הסיבוב של מחוגי השעון.

.19

א. הביטוי לגודל עוצמת השדה המגנטי כתלות בזמן הוא:

$$B(t)=B_0+0.1t=0.2+0.1t$$

ב. בהתאם לחוק פרדיי, הכא"מ המושרה בכריכה הוא מינוס נגזרת השטף המגנטי בכריכה לפי הזמן. הסימן השלילי מבטא את חוק לנץ.

$$\varepsilon=-\frac{d(BS)}{dt}=-S\frac{dB(t)}{dt}=-a^2\cdot\frac{dB(t)}{dt}=-0.4^2\cdot\frac{d(0.2+0.1t)}{dt}=$$

$$=-0.4^2\cdot 0.1=-0.016V=-1.6\cdot 10^{-2}V$$

ג. על פי חוק אוהם, עוצמת הזרם היא:

$$I=\frac{\varepsilon}{R}=\frac{0.016}{0.5}=0.032A=32mA=3.2\cdot 10^{-2}A$$

.20

א. מיד לאחר שסוגרים את המתג, עוצמת הזרם בסליל A גדלה. בפרק הזמן שבו עוצמת הזרם גדלה, גדלה גם עוצמת השדה המגנטי של סליל A, והיא מכוונת ימינה.
על פי חוק לנץ, בפרק הזמן הנדון, נוצר בסליל B זרם מושרה. זרם זה יוצר שדה מגנטי שכיוונו שמאלה.
אם השדה המגנטי של סליל B מכוון שמאלה, על פי כלל יד ימין, כיוון הזרם בנגד הוא שמאלה, מ-b ל-a.

ב. מהרגע שעוצמת הזרם בסליל A התייצבה, הסליל מתפקד כמקור של שדה מגנטי המכוון ימינה. עוצמת השדה המגנטי קבועה, לכן אין שינוי בשטף המגנטי בסליל B. כאשר מרחיקים את הסלילים זה מזה, השטף המגנטי בסליל B קטן.
לפי חוק פרדיי, נוצר בסליל הימני זרם מושרה. לפי חוק לנץ, הזרם המושרה מכוון באופן שהוא מתנגד להקטנת השטף המגנטי דרך סליל זה, כלומר השדה המגנטי המושרה בסליל B מכוון ימינה. לפיכך, כיוון הזרם המושרה בנגד המחובר לסליל B הוא ימינה, מ-a ל-b.

ג. כאשר מקטינים את ערכו של הנגד המשתנה, עוצמת הזרם בסליל השמאלי גדלה. בפרק הזמן שמקטינים את התנגדות הנגד המשתנה, דומה המצב לזה שתואר בסעיף א'. לכן, כיוון הזרם בנגד הקבוע הוא שמאלה, מ-b ל-a.

21.

א. על פי חוק לנץ, הזרם המושרה בכריכה מתנגד לקרוב המגנט. מישור הכריכה הפונה אל הקורא מתנהג כמו קוטב צפוני של מגנט. לכן, על פי כלל יד ימין, כיוון הזרם בנגד הוא ימינה, מ-a ל-b.

ב. על פי כיוון הזרם, מתבקשת המסקנה: $V_b < V_a$. לכן, הסימן האלגברי של הביטוי $V_b - V_a$ הוא שלילי.

22. השיקולים לפתרון תרגיל זה דומים במהותם לשיקולים שהוצגו בפתרון תרגיל 20.

א. מיד לאחר שסוגרים את המתג, עוצמת הזרם בסליל הראשוני (הסליל השחור באיור), גדֵלה. בפרק הזמן שעוצמת הזרם גדֵלה, גדֵלה גם עוצמת השדה המגנטי של סליל זה, ולפי כלל יד ימין, היא מכוונת ימינה.

על פי חוק לנץ, בפרק הזמן הנדון, בסליל השניוני (הסליל האדום באיור) נוצר זרם מושרה שיוצר שדה מגנטי המכוון שמאלה.

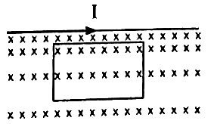
אם השדה המגנטי של הסליל האדום מכוון שמאלה, כיוון הזרם בנגד R הוא ימינה, מ-a ל-b (על פי כלל יד ימין).

ב. במקרה זה, עוצמת הזרם בסליל הראשוני קטֵנה. הקורא מוזמן ליישם את שרשרת השיקולים שהוצגו בסעיף א'. המסקנה: כיוון הזרם בנגד הוא שמאלה, מ-b ל-a.

ג. אם הסוללה מוחלפת במקור מתח חילופין, כיוון הזרם בנגד מתחלף לסירוגין.

23.

א. המערכת הנתונה מתוארת באיור הבא:



במקום שהכריכה המלבנית נמצאת, זרם התיל יוצר שדה מגנטי שנכנס לתוך מישור הדף ("x-ים"). שדה זה אינו אחיד, וככל שמתקרבים אל התיל, עוצמתו גדֵלה. לכן קרוב הכריכה לתיל מגדיל את השטף המגנטי דרך הכריכה.

כתוצאה מכך, נוצר בכריכה זרם מושרה הנוטה להתנגד להגדלת השטף דרכה (חוק לנץ). זרם הכריכה יוצר קווי שדה היוצאים מהדף.

אם קווי השדה המגנטי המושרה יוצאים מהדף, כיוון הזרם המושרה הוא נגד מגמת סיבוב מחוגי השעון.

ב. במקרה זה, לא חל כל שינוי בשטף המגנטי בכריכה. לכן, לא נוצר בו זרם מושרה.

ג. במשך הזמן שמקטינים את עוצמת הזרם בתייל, קטֵן השטף המגנטי דרך הכריכה המלבנית. על פי שרשרת השיקולים המוצגת בסעיף א', כיוון הזרם המושרה הוא במגמת סיבוב מחוגי השעון.

24.

א. נבטא את השטף המגנטי דרך כריכות הסליל המסתובב כפונקציה של הזמן.

$$\Phi(t) = NBS\cos\theta = NBS\cos(\omega\cdot t)$$

נגזור את הביטוי של השטף המגנטי כדי לקבל את גודל המתח המושרה בין קצותיו:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = -(-\omega NBS\sin(\omega\cdot t)) = \omega NBS\sin(\omega\cdot t)$$

אחד הסימנים השליליים נובע מחוק לנץ, ואילו השני נובע מפעולת הגזירה.
המקדם של הפונקציה סינוס בביטוי האחרון, מייצג את הערך המקסימלי של הכא"מ המושרה. לכן:

$$\varepsilon_{MAX} = \omega NBS$$

$$\omega = \frac{\varepsilon_{MAX}}{NBS} = \frac{0.24}{100\cdot 5\cdot 10^{-2}\cdot 0.08^2} = 7.5\,rad/s$$

$$\omega = 2\pi f \quad \Rightarrow \quad f = \omega/2\pi = 1.19\,Hz$$

ב. היות והכא"מ מחליף את סימנו האלגברי לסירוגין, הכא"מ הממוצע הוא 0. ניתן לראות את הכא"מ הממוצע כערך הממוצע של פונקצית הסינוס שהתקבלה בפתרון בסעיף א'.

ג. הגודל המקסימלי של עוצמת הזרם בסליל הוא:

$$I_{MAX} = \frac{\varepsilon_{MAX}}{R} = \frac{0.24}{20} = 0.012A = 12mA = 1.2\cdot 10^{-2}A$$

25.

א. באופן דומה לפתרון שהוצג בתרגיל הקודם, מתקיים:

$$\varepsilon = \Phi'(t) = \omega NBS\cos(\omega\cdot t) = 2\pi\cdot fNBS\cos(2\pi\cdot ft) =$$
$$= 2\pi\cdot 100\cdot 150\cdot 0.25\cdot 0.12^2\cdot\cos(2\pi\cdot 100t) = 108\pi\cdot\cos(200\pi\cdot t)$$

ב. השטף הוא מרבי בזמן $t = 0$; בזמן זה הנגזרת של השטף מתאפסת. הערך המרבי של המתח המושרה אינו משתנה. לכן, במקרה זה, המתח מבוטא באמצעות פונקצית הסינוס:

$$\varepsilon = 200\pi\cdot 150\cdot 0.25\cdot 0.12^2\cdot\sin(200\pi\cdot t) = 108\pi\cdot\sin(200\pi\cdot t)$$

.26

א. נביע את השטף המגנטי דרך הכריכה כפונקציה של הזמן. נגזרת הפונקציה לפי הזמן מבטאת את הכא"מ המושרה בכריכה. לכן:

$$\Phi(t) = NSB(t)$$

$$\Phi(t) = (0.2 \cdot 0.1)(0.5 + 2 \cdot 10^{-3} t) = 0.01 + 4 \cdot 10^{-5} t$$

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = -4 \cdot 10^{-5}\, V$$

הסימן השלילי מבטא את חוק לנץ.

ב. מאחר ועוצמת השדה המגנטי המקורי הולכת וגדֵלה, כיוון עוצמת השדה המגנטי המושרה צריך להיות לתוך הדף. לכן, בהתאם לחוק לנץ, כיוון הזרם בכריכה הוא במגמת סיבוב מחוגי השעון. עוצמת הזרם בכריכה היא:

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{4 \cdot 10^{-5}}{0.4} = 10^{-4}\, A$$

.27

א. בפרק הזמן $0\text{-}2s$, כיוון השדה המגנטי שיוצר את הזרם המושרה בכריכה פונה החוצה מהדף (בהתאם לחוק לנץ). לכן, כיוונו של הזרם המושרה הוא נגד מגמת הסיבוב של מחוגי השעון, בהתאם לכלל יד ימין. עוצמת הזרם היא:

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = -\frac{1}{R}\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{1}{R}\cdot\frac{d(BS)}{dt} = -\frac{S}{R}\cdot\frac{dB}{dt} = -\frac{0.2 \cdot 0.1}{0.4}\cdot\frac{0.4}{2} = -10^{-2}\, A$$

התחשבנו בכך שערך הנגזרת dB/dt הוא שיפוע הגרף בפרק הזמן הנדון.

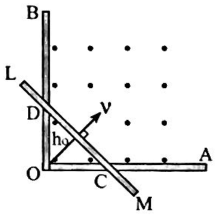
ב. בפרק הזמן 2s - 6s, השטף המגנטי דרך הכריכה קבוע. לכן, לא נוצר בה זרם מושרה.

ג. בפרק הזמן 6s - 7s, הזרם המושרה מנוגד בכיוונו לזרם המושרה בסעיף א'. מגמת הזרם המושרה היא במגמת הסיבוב של מחוגי השעון. עוצמת הזרם היא:

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = -\frac{1}{R}\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{S}{R}\cdot\frac{dB}{dt} = -\frac{0.02 \cdot}{0.4}\cdot\frac{(-0.4)}{1} = 2 \cdot 10^{-2}\, A$$

.28

א. המערכת המתוארת בשאלה נתונה באיור הבא:



נביע את גובה המשולש h התחום על ידי המוליך הנע והמסילות, כפונקציה של הזמן. בהמשך נביע את אורך היתר DC כתלות בזמן.

הערה: יש לשים לב לכך שבביטויים הבאים צמד אותיות גדולות מסמל את אורך צלע המשולש. למשל, "DC" מסמל את אורך היתר.

שטחו של המשולש $S_{\Delta DOC}$ בכל זמן הוא:

$$S = DC \cdot h / 2$$

$$h(t) = h_0 + vt$$

$$\frac{0.5 \cdot DC}{h} = \tan 45° = 1 \quad \Rightarrow DC(t) = 2(h_0 + vt)$$

$$S_{\Delta DOC} = 2(h_0 + vt)\cdot\frac{h_0 + vt}{2} = (h_0 + vt)^2$$

השטף המגנטי דרך המשולש כפונקציה של הזמן הוא:

$$\Phi(t) = B \cdot S = B \cdot (h_0 + vt)^2$$

$$\Rightarrow \quad \Phi(t) = 0.25(\sqrt{2} \cdot 0.03 + 5t) = 0.0106 + 1.25t$$

ב. הכא"מ המושרה מתקבל מגזירה של פונקציית השטף לפי הזמן. לכן:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(BS)}{dt} = -B\frac{dS}{dt} = -B\frac{d(h_0 + vt)^2}{dt} = -B \cdot 2v(h_0 + vt)$$

$$\varepsilon = -0.25 \cdot 2 \cdot 5 \cdot (0.0212 + 5t) = -(0.053 + 12.5t)$$

ג. נסמן את היקף המשולש באות P. התנגדות המוליכים במעגל היא מכפלת היקף המשולש בהתנגדות המוליכים ליחידת אורך - λ. לכן:

$$R=\lambda\cdot P=\lambda(2OC+DC)=\lambda\cdot\left(\frac{2DC}{\sqrt{2}}+DC\right)=$$
$$=\lambda\cdot DC\left(\frac{2}{\sqrt{2}}+1\right)=\lambda\left(\frac{h_0+vt}{0.5}\right)(2.414)\approx$$
$$\approx 4.83\lambda(h_0+vt)=4.83\cdot 0.025\cdot(0.0212+5t)=2.56\cdot 10^{-3}+0.6t$$

ד. נחשב את עוצמת הזרם המושרה במוליכים:

$$I=\frac{\varepsilon}{R}=\frac{-B\cdot 2v(h_0+vt)}{4.83\cdot\lambda(h_0+vt)}=\frac{-2\cdot 0.25\cdot 5}{4.83\cdot 0.025}=-20.7A$$

.29

א. מצבה של הכריכה ביחס לאזור בו קיים שדה מגנטי בפרקי זמן שונים מרוכז בטבלה הבאה. נכנה פרקי זמן אלה $\Delta t_1 - \Delta t_4$ בהתאמה. כל פרק זמן אורך 2 שניות. בטבלה רוכזו גם הביטויים שבאמצעותם יש לחשב את הגדלים המבוקשים בסעיפים א-ג בשאלה.

הערה: בשאלה זו הנחנו שהתנגדות הכריכה הריבועית היא 1Ω, לכן מתקיים $|I|=|\varepsilon|$, (ביחידות המתאימות).

פרק הזמן $\Delta t(s)$	מצב הכריכה ביחס לאזור בו קיים שדה	השטף המגנטי דרך הכריכה $\Phi\ (Wb)$	עוצמת הזרם בכריכה $I\ (A)$	הכוח החיצוני שיש להפעיל על הכריכה $F\ (N)$
0-2	מחוץ לשדה	0	0	0
2-4	נכנסת לשדה	$\Phi = Bavt$	$I = -\Phi' / R = -Bav/R$	$\lvert F\rvert = BIa$
4-6	נמצאת בשדה	$\Phi = \Phi_{max} = Ba^2$	0	0
6-8	יוצאת מהשדה	$\Phi = \Phi_{max} - Bavt$	$I = +Bav/R$	$\lvert F\rvert = BIa$

1) בפרק הזמן הראשון, Δt_1, הכריכה מחוץ לשדה המגנטי, לכן השטף המגנטי דרכה אפס.

2) בפרק הזמן השני, Δt_2, הכריכה נכנסת לשדה המגנטי. השטף המגנטי דרכה ניתן על ידי הביטוי $\Phi = Bavt = 0.5\cdot 0.5\cdot 0.25t = 0.0625t$. ביטוי זה מבטא קשר לינארי של פונקצית השטף כתלות בזמן. הזמן t נמדד מהרגע שהכריכה מתחילה את כניסתה לשדה המגנטי.

3) בפרק הזמן השלישי, Δt_3, הכריכה כולה נמצאת בשדה המגנטי, והשטף דרכה מרבי,

$$\Phi = Ba^2 = 0.5\cdot 0.5^2 = 0.125Wb$$

4) בפרק זמן זה הכריכה יוצאת מהשדה המגנטי, אך עדיין חלק ממנה נמצא בתוך השדה. השטף המגנטי דרכה ניתן על ידי הביטוי $\Phi = \Phi_{max} - Bavt$. ביטוי זה מבטא קשר לינארי של פונקצית השטף כתלות בזמן. הזמן נמדד מרגע שהכריכה מתחילה לצאת מהשדה.

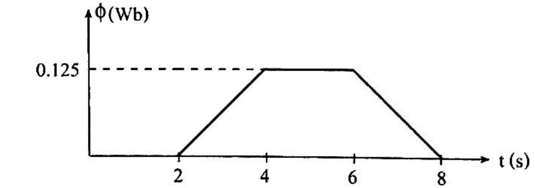
ב. בכריכה זורם זרם רק בשני פרקי הזמן Δt_2 ו-Δt_4, כי רק בהם יש שינוי בשטף המגנטי דרך הכריכה. לפי חוק לנץ, בזמן כניסת הכריכה לשדה, זורם דרכה זרם שכיוונו נגד כיוון מחוגי השעון (כיוון זה נבחר בשאלה כחיובי). בזמן יציאת הכריכה מהשדה, כיוון הזרם המושרה בכריכה הוא במגמת הסיבוב של מחוגי השעון. עוצמת הזרם ניתנת על ידי נגזרת פונקצית השטף ועל ידי יישום חוק אוהם:

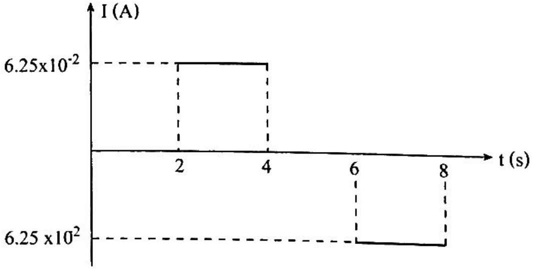
$$I=\frac{\varepsilon}{R}=\frac{(d\Phi/dt)}{R}=\frac{Bav}{R}=\frac{0.5\cdot 0.5\cdot 0.25}{1}=6.25\cdot 10^{-2}A$$

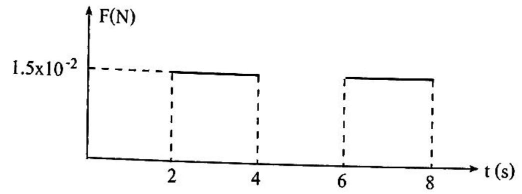
ג. יש להפעיל כוח רק בפרקי הזמן בהם זורם זרם דרך הכריכה. הכוח המגנטי על הכריכה נוטה להתנגד לשינוי השטף דרך הכריכה, לכן הוא בכל מקרה נגד כיוון תנועת הכריכה. גודל הכוח החיצוני שיש להפעיל על הכריכה שווה בערכו לכוח המגנטי, ומנוגד לו בכיוונו, כי רק כך תנוע הכריכה במהירות קבועה. לכן:

$$F_{EXT}=|F_B|=|BIa|=0.5\cdot 6.25\cdot 10^{-2}\cdot 0.5=1.56\cdot 10^{-2}N$$

מצורפים הגרפים המסכמים תרגיל זה:







.30

א. לפי חוק לנץ, כיוון הזרם המושרה במוט הוא <u>שמאלה</u>.

ב. על המוט פועלים שני כוחות והם: כוח הכובד $F_G = mg$, והכוח המגנטי $F_B = BIL$. הכוח המגנטי מכוון (על פי חוק לנץ) בניגוד לכיוון מהירותו של המוט. לכן, תנועתו אינה "נפילה חופשית".

ג. הכוח F_G הוא גודל קבוע. לעומת זאת, מהירותו של המוט גדֵלה, ויחד איתו גדֵל הכוח המגנטי. ברגע מסוים הכוחות משתווים בערכם המוחלט, ומרגע זה ואילך תאוצת המוט היא אפס ולכן, תנועת המוט קצובה ומהירותו מכסימלית. הדבר דומה לתנועתו של צנחן שמגיע למהירותו המכסימלית בזמן הצניחה. מהשוואת הכוחות מתקבל:

$$mg = BIl = B\cdot\frac{Bvl}{R}\cdot l = \frac{B^2vl^2}{R}$$

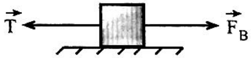
$$v_{\max} = \frac{mgR}{B^2l^2}$$

.31

א. לפי חוק לנץ, כיוון הזרם המושרה בנגד הוא אל הצופה (ראה איור בספר הלימוד).

ב. הכוחות הפועלים על המסה התלויה הם $M\vec{g}$ והמתיחות $\vec{T}$ – ראה איור.

הכוחות הפועלים על המוט המחליק, במקביל לכיוון תנועתו, הם המתיחות $\vec{T}$ והכוח המגנטי $\vec{F}_B$ – ראה איור (מבט מהצד).



הכוח המגנטי ניתן על ידי הביטוי:

$$F_B = BIl = \frac{B^2vl^2}{R}$$

המוט יוצא לדרכו ממנוחה. לכן, בתחילת התנועה מהירותו קטנה יחסית והכוח המגנטי קטן ביחס לכוח הכובד. עם הזמן, הכוח המגנטי הפועל על הקורה משתווה בגודלו לכוח הכובד הפועל על הגוף התלוי (ראה פתרון לתרגיל הקודם). לכן:

1) מהירות המערכת הולכת וגדֵלה עד שהיא מגיעה לערכה המכסימלי.

2) תאוצת המערכת הולכת וקטֵנה עד שהיא מתאפסת.

ג. נרשום את משוואת התנועה של כל אחד מהגופים שמרכיבים את המערכת:

$$Mg - T = Ma$$

$$T - F_B = ma$$

שני הגופים נעים באותה תאוצה a. מחיבור שתי המשוואות האחרונות מתקבל:

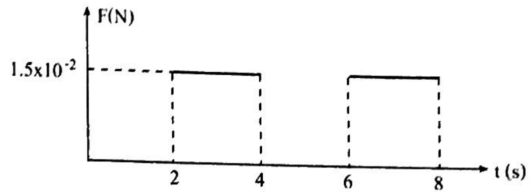
$$Mg - F_B = (M+m)a$$

$$a = \frac{Mg - F_B}{M+m}$$

כאשר המערכת מגיעה למהירותה המכסימלית, התאוצה מתאפסת. לכן, נשווה לאפס את המונה בביטוי המבטא את התאוצה:

$$Mg = F_B = BIl = \frac{B^2vl^2}{R}$$

$$\Rightarrow v_{\max} = \frac{MgR}{B^2l^2}$$



.30

א. לפי חוק לנץ, כיוון הזרם המושרה במוט הוא <u>שמאלה</u>.

ב. על המוט פועלים שני כוחות והם: כוח הכובד $F_G = mg$, והכוח המגנטי $F_B = BIL$. הכוח המגנטי מכוון (על פי חוק לנץ) בניגוד לכיוון מהירותו של המוט. לכן, תנועתו אינה "נפילה חופשית".

ג. הכוח F_G הוא גודל קבוע. לעומת זאת, מהירותו של המוט גְדֵלה, ויחד איתו גָדֵל הכוח המגנטי. ברגע מסוים הכוחות משתווים בערכם המוחלט, ומרגע זה ואילך תאוצת המוט היא אפס ולכן, תנועת המוט קצובה ומהירותו מכסימלית. הדבר דומה לתנועתו של צנחן שמגיע למהירותו המכסימלית בזמן הצניחה. מהשוואת הכוחות מתקבל:

$$mg = BIl = B \cdot \frac{Bvl}{R} \cdot l = \frac{B^2vl^2}{R}$$

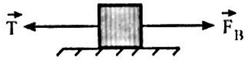
$$v_{max} = \frac{mgR}{B^2l^2}$$

.31

א. לפי חוק לנץ, כיוון הזרם המושרה בנגד הוא אל הצופה (ראה איור בספר הלימוד).

ב. הכוחות הפועלים על המסה התלויה הם $M\vec{g}$ והמתיחות $\vec{T}$ – ראה איור.

הכוחות הפועלים על המוט המחליק, במקביל לכיוון תנועתו, הם המתיחות $\vec{T}$ והכוח המגנטי $\vec{F}_B$ – ראה איור (מבט מהצד).



הכוח המגנטי ניתן על ידי הביטוי:

$$F_B = BIl = \frac{B^2vl^2}{R}$$

המוט יוצא לדרכו ממנוחה. לכן, בתחילת התנועה מהירותו קטנה יחסית והכוח המגנטי קטן ביחס לכוח הכובד. עם הזמן, הכוח המגנטי הפועל על הקורה משתווה בגודלו לכוח הכובד הפועל על הגוף התלוי (ראה פתרון לתרגיל הקודם). לכן:

1) מהירות המערכת הולכת וגְדֵלה עד שהיא מגיעה לערכה המכסימלי.

2) תאוצת המערכת הולכת וקְטֵנה עד שהיא מתאפסת.

ג. נרשום את משוואת התנועה של כל אחד מהגופים שמרכיבים את המערכת:

$$Mg - T = Ma$$

$$T - F_B = ma$$

שני הגופים נעים באותה תאוצה a. מחיבור שתי המשוואות האחרונות מתקבל:

$$Mg - F_B = (M+m)a$$

$$a = \frac{Mg - F_B}{M+m}$$

כאשר המערכת מגיעה למהירותה המכסימלית, התאוצה מתאפסת. לכן, נשווה לאפס את המונה בביטוי המבטא את התאוצה:

$$Mg = F_B = BIl = \frac{B^2vl^2}{R}$$

$$\Rightarrow v_{max} = \frac{MgR}{B^2l^2}$$

.32

א. השטף המגנטי במעגל החשמלי קטן. לכן, על פי חוק לנץ, כיוון הזרם המושרה בקורה הוא מ-b ל-a.

ב. הקורה מגיעה למהירותה המכסימלית כאשר הרכיבים של הכוח המגנטי ושל כוח הכובד הפועלים במקביל למדרון משתווים זה לזה (ראה תרשים). כלומר:

$$Mg\sin\theta = F_B\cos\theta$$

הכא"מ המושרה במוט הוא:

$$\varepsilon = BLv\cdot\cos\theta$$

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{BLv\cos\theta}{R}$$

$$F_B = BIL = \frac{B^2L^2v\cos\theta}{R}$$

$$Mg\sin\theta = \frac{B^2\cos^2\theta\cdot v_{MAX}\cdot L^2}{R}$$

$$v_{max} = \frac{RMg\sin\theta}{B^2\cos^2\theta\cdot L^2} = \frac{RMg\tan\theta}{B^2\cdot L^2\cdot\cos\theta}$$

ג. עוצמת הזרם בקורה, כאשר מהירותה מכסימלית, ניתנת על ידי הביטוי:

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{B\cos\theta\cdot v_{MAX}\cdot L}{R} = \frac{Mg\tan\theta}{BL}$$

ד. כאשר מהירות הקורה מכסימלית, הספק החום הנוצר בה הוא:

$$P = I^2R = \left(\frac{Mg\tan\theta}{BL}\right)^2\cdot R$$

ה. נסמן את הספק העבודה המתבצעת על ידי כוח הכובד על הקורה ב-P_G. ערכו של P_G ניתן על ידי הביטוי:

$$P_G = Mg\cdot\sin\theta\cdot v_{max}$$

נציב בביטוי האחרון את הפתרון ל- v_{max} שהתקבל בסעיף ב' ונקבל:

$$P_G = \frac{RM^2g^2\sin^2\theta}{B^2\cos^2\theta\cdot L^2} = \left(\frac{Mg\tan\theta}{BL}\right)^2\cdot R$$

הביטוי שהתקבל זהה לפתרון שהתקבל בסעיף ד'.

.33

א. לפי חוק לנץ, כיוון הזרם המושרה בנגד הוא מ-O ל-A.

ב. נסמן את רדיוס המעגל ב-r ואת התנגדות הנגד ב-R. השטח S של הגזרה התחומה על ידי המוליכים הוא ביחס ישר לזווית המרכזית θ:

$$\frac{\pi\cdot r^2}{2\pi} = \frac{S}{\theta} \quad\Rightarrow\quad S = \frac{\theta\cdot r^2}{2}$$

השטף המגנטי בגזרה התחומה על ידי המוליכים הוא:

$$\Phi = BS = B\frac{\theta\cdot r^2}{2} = \frac{Br^2(\omega\cdot t)}{2}$$

ג. בהנחה שהתנגדות המוט AO והקשת זניחות, עוצמת הזרם בנגד היא:

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = -\frac{\Phi'}{R} = -\frac{Br^2\omega}{2R}$$

ד. כמות החום שנוצרת בנגד בפרק זמן של רבע זמן מחזור היא:

$$E_{nergy} = I^2R\cdot\frac{T}{4} = \left(\frac{Br^2\omega}{2R}\right)^2\frac{RT}{4} = \frac{B^2r^4\omega^2R\cdot(2\pi/\omega)}{4R^2\cdot 4} = \frac{B^2r^4\pi\cdot\omega}{8R}$$

.34

א. לאחר זמן t הטבעת הנופלת נפילה חופשית נמצאת בגובה y מעל פני הקרקע. (הערה: בפועל, פועל על הטבעת כוח מגנטי המעכב את נפילתה. אנחנו נתעלם מכוח זה ונשאיר לפותר המיומן את ההתמודדות עם שיקול זה. ההתמודדות יכולה להיות בדרך אנליטית או בדרך נומרית, באמצעות גיליון אלקטרוני).

נביע את הגובה y בנתוני השאלה: $y = H - \frac{gt^2}{2}$

עוצמת השדה המגנטי בגובה זה היא:

$$B = B_0 - ky = B_0 - k(H - \frac{gt^2}{2})$$

נחשב את שטח הכריכה המעגלית S מתוך ידיעת רדיוס הכריכה r. בהמשך, נחשב את השטף המגנטי דרכה, כאשר היא נמצאת בגובה y:

$$S = \pi\cdot r^2$$

$$\Phi = BS = \pi\cdot r^2\left[B_0 - k(H - \frac{gt^2}{2})\right]$$

ב. ככל שהזמן חולף, y קטֵן, בעוד שעוצמת השדה המגנטי גדֵלה (על פי הביטוי הנתון). השטף המגנטי דרך הטבעת גדֵל ובטבעת נוצר זרם מושרה. לפי חוק לנץ, זרם מושרה זה יוצר שדה מגנטי המכוון כלפי מעלה. על פי כלל יד ימין, צופה המביט אל הטבעת מהקרקע "רואה" את הזרם במגמת סיבוב מחוגי השעון. הזרם בטבעת יוצר שדה מגנטי שכיוונו מנוגד לשדה המגנטי של הארץ. (שימו לב! הצופה שמביט מעל הטבעת, רואה את כיוון הזרם נגד מגמת הסיבוב של מחוגי השעון).

ג. נחשב את הכא"מ המושרה בטבעת על פי ההנחות שפירטנו:

$$\varepsilon = -\Phi'$$

$$\Phi = BS = \pi \cdot r^2\left[B_0 - k(H - \frac{gt^2}{2})\right]$$

$$\Phi = \pi \cdot r^2 B_0 - \pi \cdot r^2 kH + \left(\frac{\pi \cdot r^2 gkt^2}{2}\right)$$

$$\varepsilon = -\Phi' = -\pi \cdot r^2 \cdot g \cdot k \cdot t$$

הערה: הכא"מ המושרה גדֵל באופן לינארי עם זמן. בפועל, הכא"מ מגיע לערך מכסימלי כאשר הכריכה מגיעה למהירותה המכסימלית. תוצאה זו שקיבלנו, שאינה מייצגת נאמנה את המציאות, התקבלה כי התעלמנו מהכוח המגנטי המאט את נפילת הכריכה.

.35

א. נחשב את עוצמת השדה המגנטי במרכז כריכה A, ואת השטף המגנטי דרך כריכה B:

$$B_A = \frac{N\mu_0 I}{2R} = \frac{5 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}(0.2 + 0.3t)}{2 \cdot 0.2} = 1.57 \cdot 10^{-5}(0.2 + 0.3t)$$

$$\Phi_B = B_A(NS)_B = 1.57 \cdot 10^{-5}(0.2 + 0.3t)(15 \cdot \pi \cdot 0.03^2) =$$

$$= 6.66 \cdot 10^{-7}(0.2 + 0.3t) = 1.33 \cdot 10^{-7} + 2 \cdot 10^{-7} t$$

ב. על פי השיקולים שהצגנו בפתרון לסעיף א', מתקבל:

$$B_A = \frac{N\mu_0 I}{2R} = \frac{5 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}(10 - 0.4t)}{2 \cdot 0.2} = 1.57 \cdot 10^{-5}(10 - 0.4t)$$

$$\Phi_B = B_A(NS)_B = 1.57 \cdot 10^{-5}(10 - 0.4t)(15 \cdot \pi \cdot 0.03^2) =$$

$$= 6.66 \cdot 10^{-7}(10 - 0.4t) = 6.66 \cdot 10^{-6} - 2.66 \cdot 10^{-7} t$$

ג. עוצמות הזרמים הן:

$${}_{\text{א}}I = \frac{\varepsilon}{R} = -\frac{{}_{\text{א}}\Phi'_B}{R} = -\frac{2 \cdot 10^{-7}}{10^{-5}} \approx -0.02A$$

$${}_{\text{ב}}I = \frac{\varepsilon}{R} = -\frac{{}_{\text{ב}}\Phi'_B}{R} = -\frac{-2.66 \cdot 10^{-7}}{10^{-5}} \approx 0.026A$$

במקרה ב', כיוון הזרם בנגד מנוגד במגמתו לכיוון הזרם שבסעיף א'. ניתן לראות היפוך מגמות זה בסימנים האלגבריים השונים של עוצמות הזרמים.

לפי חוק לנץ, במקרה א', כיוון הזרם בנגד של סליל B הוא מ-b ל-a.

במקרה ב', כיוון הזרם בנגד של סליל B הוא מ-a ל-b.

.36

א. עוצמת הזרם בסילונית הארוכה הולכת וגדֵלה, לכן, לפי חוק לנץ, כיוון הזרם בסילונית הקטנה הוא ימינה.

ב. השטף המגנטי דרך הסילונית הקטנה גדֵל באופן לינארי עם הזמן. הכא"מ בסילונית זו הוא הנגזרת של השטף המגנטי דרכה. ערך הנגזרת אינו משתנה עם הזמן. לכן, עוצמת הזרם בסילונית הקטנה קבועה. חיזוק לטענה זו נמצא בפתרון המתקבל בסעיף ג' להלן.

ג. שלבי הפתרון הם:

- נרשום ביטוי לעוצמת השדה המגנטי B של הסילונית הגדולה;
- נחשב את שטחה S של כריכה בודדת בסילונית הקטנה;
- נחשב את השטף המגנטי Φ דרך 300 הכריכות של הסילונית הקטנה;
- נחשב את הכא"מ המושרה ε בסילונית הקטנה על ידי גזירת הביטוי המבטא את השטף המגנטי Φ לפי הזמן;
- עוצמת הזרם בסילונית הקטנה ניתנת על ידי הביטוי $\frac{\varepsilon}{R}$.

$$B = \mu_0 \frac{N}{L} I = \mu_0 nI = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 5000 \cdot 5t = 3.14 \cdot 10^{-2} t$$

$$S = \pi \cdot r^2 = \pi 0.003^2 = 2.83 \cdot 10^{-5}\ m^2$$

$$\Phi = B(NS) = 3.14 \cdot 10^{-2} t(300 \cdot 2.83 \cdot 10^{-5}) = 2.66 \cdot 10^{-4} t$$

$$\varepsilon = -\Phi' = -2.66 \cdot 10^{-4}\ Volt$$

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{-2.66 \cdot 10^{-4}}{4} = -6.66 \cdot 10^{-5} A$$

37.

א. משוואת המקום של המוט הנע לאורך הניצב האופקי ON היא $x = vt$.

L- מבטא את אורך המוט בין שתי נקודות המגע בשתי המסילות, M ו-N. נבטא את L:

$$\frac{L}{x} = \tan\theta \qquad \Rightarrow L = v\cdot t\cdot\tan\theta$$

הכא"מ הנוצר בין קצות המוט הנע ניתן לביטוי על ידי הקשר הבא:

$$\varepsilon = BLv = B\cdot(v\cdot t\cdot\tan\theta)\cdot v = B\cdot v^2\cdot\tan\theta\cdot t$$

ב. השטף המגנטי דרך שטח המשולש הולך וגדֵל כתוצאה מגידול שטח המשולש. לכן, על פי חוק לנץ, הזרם המושרה יוצר שדה מגנטי שכיוונו לתוך הדף. לפי כלל יד ימין, כיוון הזרם המושרה במוט הוא כלפי מטה.

ג. התנגדות המסגרת $R(t)$ בכל רגע, היא מכפלת היקף המשולש P בהתנגדות המוליכים ליחידת אורך λ. נבטא את הגדלים P , R ו-I:

$$P = ON + NM + MO = vt + vt\cdot\tan\theta + \frac{vt}{\cos\theta} = vt\cdot\left(1+\tan\theta+\frac{1}{\cos\theta}\right)$$

$$R = \lambda\cdot P = \lambda\cdot vt\cdot\left(1+\tan\theta+\frac{1}{\cos\theta}\right)$$

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{B\cdot v^2\cdot\tan\theta\cdot t}{\lambda\cdot vt\cdot\left(1+\tan\theta+\frac{1}{\cos\theta}\right)} = \frac{B\cdot v\cdot\tan\theta}{\lambda\cdot\left(1+\tan\theta+\frac{1}{\cos\theta}\right)}$$

מהביטוי האחרון מתברר שעוצמת הזרם קבועה (היא אינה תלויה בזמן).

ד. כדי שהמוט ינוע ימינה בתנועה קצובה, יש להפעיל עליו כוח חיצוני F_{EXT} בכיוון התנועה, כך שיאפס את הכוח המגנטי BIL, המכוון נגד כיוון תנועת המוט. לכן: $F_{EXT} = BIL$.

לפי הביטויים שהתקבלו בסעיף ג', עוצמת הזרם קבועה, אבל אורך המוט L, הסוגר את המעגל החשמלי, הולך וגדֵל. לכן, כוח זה הולך וגדֵל ככל שהזמן חולף.

38. נחשב את השטף המגנטי דרך הסליל ואת הכא"מ המושרה שנוצר בו:

$$\Phi = NBS\cdot\sin\theta$$

$$\varepsilon = -\frac{\Delta(NBS\cdot\sin\theta)}{\Delta t} = -NB\cdot\sin\theta\frac{\Delta S}{\Delta t}$$

$$\varepsilon = -200\cdot(4\cdot10^{-5}\sin25°)\cdot\frac{35\cdot10^{-4}}{1.5} = -7.89\cdot10^{-6}\,Volt$$

39.

א. הביטוי לשטף המגנטי דרך N כריכות המסתובבות בשדה מגנטי שעוצמתו B בתדירות f הוא:

$$\Phi = NBS\cos(2\pi\cdot ft)$$

נגזור את השטף המגנטי לפי הזמן ונקבל את המתח בין קצות הסליל:

$$\varepsilon = -\Phi' = -[NBS\cos(2\pi\cdot ft)]' = (2\pi\cdot fNBS)\sin(2\pi\cdot ft) = \varepsilon_{max}\sin(2\pi\cdot ft)$$

נחשב את שטחה של כריכה בודדת מתוך הנתון $\varepsilon_{max} = 6Volt$:

$$2\pi\cdot f\cdot NBS = \varepsilon_{max}$$

$$S = \frac{\varepsilon_{max}}{2\pi\cdot f\cdot NB} = \frac{6}{2\pi\cdot50\cdot1000\cdot4\cdot10^{-5}} = 0.477\,m^2$$

ב. בהנחה שהכריכות מעגליות, מתקיים:

$$S = \pi\cdot R^2 \qquad \Rightarrow \qquad R = \sqrt{\frac{S}{\pi}} = \sqrt{\frac{0.477}{\pi}} \approx 0.39m = 39cm$$

40.

א. נתייחס אל השדה המגנטי בקרבת המוליך כאל שדה מגנטי שנוצר על ידי תייל אינסופי. עוצמת השדה המגנטי במרכז הכריכה ניתנת על ידי הביטוי הבא:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi\cdot d} = \frac{2\cdot10^{-7}I}{3} = 6.68\cdot10^{-8}\cdot300\sin(2\pi\cdot ft) = 2\cdot10^{-5}\sin(100\pi\cdot t)$$

נבטא את השטף המגנטי דרך הכריכה המעגלית. שטח הכריכה הוא $\pi\cdot0.4^2$. לכן:

$$\Phi = NBS = 1000\cdot[2\cdot10^{-5}\sin(100\pi\cdot t)]\cdot\pi\cdot0.4^2\cdot = 10^{-2}\sin(100\pi\cdot t)$$

ב. לפי חוק פרדיי-לנץ, המתח בין קצות הסליל הוא:

$$\varepsilon = -\Phi' = -[10^{-2}\sin(100\pi\cdot t)]' = -100\pi\cdot10^{-2}\cos(100\pi\cdot t) = \pi\cdot\cos(100\pi\cdot t)$$

ערכו המרבי של המתח בקצות הסליל שווה למקדם הפונקציה האחרונה, כלומר:

$$\varepsilon_{max} = 3.14Volt$$

ג. הספק החום בנגד מחושב לפי הביטוי הבא:

$$P = \frac{\varepsilon^2}{R} = \frac{[\pi\cdot\cos(100\pi\cdot t)]^2}{R} = \frac{\pi^2\cdot\cos^2(100\pi\cdot t)}{R}$$

ד. התלמיד השתמש באנרגיה חשמלית, וחברת החשמל סיפקה אנרגיה זו. התלמיד לא שילם לחברת החשמל עבור צריכת אנרגיה זו. מצד שני, הצרכנים משלמים עבור צריכת האנרגיה לפי המונה המותקן בכל בית. במושגים של חברת חשמל, זוהי אנרגיה אבודה שאיש לא שילם תמורתה. לסיכום, התלמיד גרם הפסד כספי לחברת החשמל.

.41

א. הגרף מתאר את השטף המגנטי דרך הכריכה. נחשב את עוצמת השדה המגנטי בזמן $t = 4s$, מתוך ידיעת השטף המגנטי ושטח הכריכה:

$$\Phi = BS \quad \Rightarrow \quad B = \frac{\Phi}{S} = \frac{0.4}{0.2 \cdot 0.3} = 6.67T$$

ב. לפי הגרף, בזמן $t = 2.5s$, גודל השטף המגנטי הוא $0.6T \cdot m^2$. על פי החישוב שהוצג בסעיף הקודם, מתקבל:

$$B = \frac{0.6}{0.2 \cdot 0.3} = 10T$$

ג.

1) בפרק הזמן 0 - $2s$, עוצמת הזרם היא אפס, כי אין שינוי בשטף המגנטי דרך הכריכה.

2) בפרק הזמן $2s$ - $3s$, שיפוע הגרף מייצג את נגזרת השטף המגנטי בכריכה, כלומר את הכא"מ המושרה בה ε. לכן, עוצמת הזרם היא:

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = -\frac{\Phi'}{R} = -\frac{((0.4-0.8)/1)}{0.2} = +2A$$

3) בפרק הזמן $3s$ - $5s$, עוצמת הזרם היא אפס כי אין שינוי בשטף המגנטי דרך הכריכה.

4) הפתרון דומה לזה שהוצג בסעיף ג-2. מתקבל:

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = -\frac{\Phi'}{R} = -\frac{((0.8-0.4)/1)}{0.2} = -2A$$

סימני עוצמות הזרמים מראים שבשני המקרים בהם זורם זרם בכריכה, מגמות הזרמים מנוגדות.